ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И АППАРАТАХ И ВОПРОСЫ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ



ВЫСШАЯ ШКОЛА

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И АППАРАТАХ И ВОПРОСЫ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Под редакцией
профессора О.Д.Гольдберга

*Допущено
Министерством образования
Российской Федерации
в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся
по специальностям «Электромеханика»,
«Электрические и электронные аппараты»*



Москва
«Высшая школа» 2001

УДК 621.313
ББК 31.26
П27

Рецензенты:

кафедра «Электрические машины» Московского государственного университета путей сообщения (зав. кафедрой академик АЭН РФ, академик Академии транспорта, д-р техн. наук, проф. *Б. А. Метелкин*); академик АЭН РФ, д-р техн. наук, проф. *Б. Л. Алиевский* (Московский государственный авиационный институт); чл.-корр. АЭН РФ, д-р техн. наук, проф. *П. А. Курбатов* (Московский энергетический институт)

Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах
П27 и вопросы их проектирования: Учеб. пособие для вузов/ О. Д. Гольдберг, О. Б. Буль, И. С. Свириденко, С. П. Хелемская; Под ред. Гольдберга О. Д. — М.: Высш. шк., 2001. — 512 с.: ил.
ISBN 5-06-003844-0

Рассмотрены вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения, показано различие подходов к проектированию отдельных машин и серий асинхронных двигателей, даны примеры расчета и все необходимые справочные данные. Описаны переходные процессы в электрических машинах и трансформаторах и приведены примеры их расчета с применением ЭВМ. Приведены магнитные материалы, динамика работы электромеханических аппаратов и компьютерные технологии построения графиков. Расчеты проводятся в системе MathCAD.

Для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Электромеханика» и «Электрические и электронные аппараты».

УДК 621.313
ББК 31.26

Учебное издание

**Гольдберг Оскар Давидович, Буль Олег Болеславович
Свириденко Иван Семенович, Хелемская Софья Петровна**

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ И АППАРАТАХ И ВОПРОСЫ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Редактор *Н. Е. Овчеренко*
Художественный редактор *Ю. Э. Иванова.* Художник *К. Э. Семенков*
Технические редакторы *Н. В. Быкова, Л. А. Овчинникова*
Компьютерная верстка *Н. С. Михайлова.* Оператор *В. Н. Новоселова*

ЛР № 010146 от 25.12.96. Изд. № ВТИ-75. Сдано в набор 16.08.2000. Подп. в печать 16.07.2001
Формат 60x88 1/16. Бум. газетн. Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Объем: 31,36 усл. печ. л., 31,36 усл. кр.-отт., 30,51 уч.-изд. л. Тираж 6000 экз. Зак. 2087

ФГУП «Издательство «Высшая школа», 127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14

Факс: 200-03-01, 200-06-87 E-mail: V-Shkola@g23.relcom.ru http: // www.v-shkola.ru

Набрано на персональных компьютерах издательства

Отпечатано во ФГУП ИПК «Ульяновский Дом печати». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ISBN 5-06-003844-0

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по специальностям «Электромеханика» и «Электрические и электронные аппараты» предусмотрено изучение ряда специальных дисциплин. Среди них наиболее существенными и сложными, с точки зрения профессиональной подготовки студентов, являются курсы «Проектирование электрических машин», «Переходные процессы в электрических машинах» и «Специальные вопросы электрических аппаратов». Необходимость в создании настоящего учебного пособия, в котором изложены основные положения вышеназванных курсов, возникла потому, что учебник, объединяющий их, отсутствует, несмотря на то что многие вопросы этих дисциплин должны изучаться студентами обеих специальностей.

В ч. I основное внимание уделено проектированию асинхронных двигателей как наиболее массовой продукции электромашиностроения.

В ч. II акцентировано внимание на анализе переходных процессов, связанных с характерными режимами работы электрических машин (включение, пуск, к.з. и пр.).

В ч. III рассмотрены магнитные материалы, векторные диаграммы, переходные процессы в электрических аппаратах и компьютерные технологии построения графиков. Последние (третий раздел ч. III) представляют интерес для студентов, инженеров и научных работников практически всех специальностей, так как, хотя примеры и относятся к электрическим аппаратам, но рекомендации и описание самого процесса построения графиков в этом разделе имеют общий характер и могут быть использованы в любой области.

Настоящее учебное пособие преследует ряд целей:

— изложить указанные специальные вопросы электрических машин и аппаратов в одной книге;

— обеспечить изучение перечисленных дисциплин на современном уровне с использованием соответствующих компьютерных систем;

— дать возможность студентам, обучающимся по специальностям «Электромеханика» и «Электрические и электронные аппараты», широко пользоваться материалами, приведенными в учебнике, на практических и лабораторных занятиях, при подготовке к госэкзаменам, в процессе курсового и дипломного проектирования.

Распределение материала учебника между авторами следующее:

часть I — академик Академии электротехнических наук (АЭН) РФ, д-р техн. наук, проф. О.Д. Гольдберг, канд. техн. наук, доц. С.П. Хелемская;

часть II — канд.техн. наук, проф. И.С. Свириденко;

часть III — канд.техн. наук, проф. О.Б. Буль.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность рецензентам учебника — кафедре «Электрические машины» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) и ее заведующему академику Академии транспорта и АЭН РФ, д-ру техн. наук, проф. Б.А. Метелкину; проф. кафедры «Электроэнергетические и электромеханические системы» Московского государственного авиационного института (технического университета) академику АЭН РФ, д-ру техн. наук Б.Л. Алиевскому и проф. кафедры «Электрические и электронные аппараты» Московского энергетического института (технического университета), чл.-корр. АЭН РФ, д-ру техн. наук П.А. Курбатову за ценные замечания, сделанные по рукописи. Все они с благодарностью были приняты.

Авторы также признательны канд. техн. наук, доц. А.И. Голубович, инженерам А.Ю. Шерстнякову, А.В. Федулову и Н.Н. Гусаровой за помощь, оказанную ими при подготовке рукописи учебника.

Все замечания и пожелания направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/ 14, издательство «Высшая школа».

Авторы

ЧАСТЬ I
Инженерное проектирование асинхронных двигателей

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. Основные направления в развитии электромашиностроения

Электромашиностроение прошло большой путь развития, начиная от простейших моделей, созданных полтора века тому назад на основе открытий М. Фарадея (1821 — 1831), до современных электродвигателей и генераторов.

Хотя на протяжении нескольких последних десятилетий принципы устройства электрических машин остались в основном теми же, однако коренным образом изменились их конструктивное оформление, рабочие характеристики и технико-экономические показатели. При этом почти все электромашиностроители перешли на проектирование и изготовление рядов или серий электрических машин, соответствующих современному техническому уровню и изготовляемых на различных заводах по единой технической документации, обеспечивая целесообразную специализацию производства на основе современной технологии.

В настоящее время отечественной электропромышленностью изготовляются асинхронные двигатели мощностью от 0,12 до 400 кВт единой серии 4А и мощностью свыше 400 до 1000 кВт — серии А4, а также серии AI — мощностью от 0,04 до 315 кВт.

Новые серии разработаны с учетом международных норм-рекомендаций МЭК. В области асинхронных двигателей разработка

серий проводилась в соответствии с согласованными общими рекомендациями по унифицированной увязке установочных размеров со шкалой мощностей.

Наибольший удельный вес в выпуске электрических машин занимают асинхронные двигатели, конструкция которых относительно простая, а трудоемкость изготовления малая. Асинхронные двигатели мощностью 0,12 — 400 кВт потребляют в России более 40% всей вырабатываемой электрической энергии.

Основные тенденции в развитии электромашиностроения:

применение утоньшенной корпусной изоляции и обмоточных проводов с малой толщиной изоляции (главным образом эмальпроводов), обладающих необходимой механической и электрической прочностью. При этом повышается коэффициент заполнения обмоточного пространства медью и соответственно использование объема машины;

использование более нагревостойкой изоляции. В начале развития электромашиностроения применялась изоляция класса нагревостойкости A, затем — классов E и B, а в настоящее время наибольшее распространение находит изоляция класса F. В машинах, работающих в более тяжелых условиях, распространена изоляция класса нагревостойкости H;

применение улучшенных марок электротехнической стали. Широко используемые в настоящее время марки холоднокатаной электротехнической стали обладают большей магнитной проницаемостью и меньшими удельными потерями в сравнении с соответствующими марками горячекатаной стали;

усовершенствование охлаждения машин путем повышения производительности вентиляторов, уменьшения аэродинамического сопротивления воздухопровода, увеличения поверхности охлаждения отдельных обмоток и всей машины за счет оребрения корпуса (в закрытых машинах), а также усиления теплопередачи путем лучшего заполнения воздушных прослоек в обмотках пропитывающими лаками и компаундами;

усовершенствование методов расчета машин;

улучшение конструкции машин с придачей узлам и деталям эстетических и рациональных форм при обеспечении снижения их массы и повышения прочности.

Перечисленные направления содействуют понижению массы и габаритов машин. Например, за период с 1915 г. по настоящее время масса асинхронных двигателей одинаковой мощности снизилась в среднем в три раза. Развитию технического уровня электрических машин сопутствуют и другие тенденции:

снижение динамического момента инерции за счет уменьшения объема двигателя, следовательно, и объема вращающейся части двигателя (ротора или якоря), а также путем увеличения отношения длины сердечника ротора или якоря к его диаметру;

повышение надежности машин, в частности за счет широкого распространения машин закрытого исполнения, в которых для улучшения охлаждения используют обдув наружной поверхности. Например, асинхронные двигатели мощностью до 15 кВт выпускаются в настоящее время только в закрытом исполнении с наружным обдувом (степень защиты IP44, способ охлаждения IC0141 — см. § 1.2). Значительно повышает надежность электрических машин применение конструкции изоляции с повышенной электрической и механической прочностью и ряд других мероприятий.

Энергетические показатели машин (КПД и cosφ) в основном сохраняются на одном уровне.

Основным исполнением перечисленных единых серий электрических машин являются машины общего назначения. Под *машинами общего назначения* подразумеваются такие машины, которые могут применяться в различных отраслях народного хозяйства, в отличие от специальных машин, предназначенных для использования в определенных специфических условиях, например взрывозащищенных, краново-металлургических, тяговых и т. п.

На базе машин общего назначения проектируют и изготовляют без значительного изменения конструкции модификации машин, обладающие несколько измененными характеристиками, которые рассчитаны на удовлетворение требований отдельных видов электропривода. Например, у асинхронных двигателей модификациями могут быть *двигатели с повышенным скольжением, многоскоростные двигатели с переключением числа полюсов* и т. п.

1.2. Стандартизация в области электрических машин

Значение стандартизации. Одна из важнейших задач народного хозяйства — улучшение качества продукции, неразрывно связанное с уровнем стандартизации. Основные технические требования к конструктивным исполнениям, размерам и параметрам, методам и средствам испытаний электрических машин, а также требования к материалам и полуфабрикатам, необходимым для производства машин, устанавливаются и определяются стандартами.

К основным международным организациям в области стандартизации по электротехнике, участником которых является Россия, относятся Международная организация по стандартизации (ИСО) и Международная электротехническая комиссия (МЭК).

В настоящее время практически все национальные стандарты по электрическим машинам создаются с учетом или непосредственно на базе рекомендаций ИСО и МЭК. Начиная с 1972 г. ИСО выпускает международные стандарты.

При проектировании электрических машин должны учитываться требования стандартов России, а также рекомендации ИСО и МЭК.

В следующих разделах рассматриваются стандартизованные виды исполнений и их обозначения, выходные параметры и размеры наружных частей (установочные и присоединительные размеры) электрических машин.

Номинальные режимы работы. Номинальные данные электрических машин должны соответствовать определенному режиму работы. ГОСТ 183 — 74 предусматривает режим работы с условными обозначениями S1 — S8. Наиболее распространен продолжительный номинальный режим работы, который характеризуется продолжительностью работы машины, достаточной для достижения установившейся температуры всех частей электрической машины при неизменной внешней нагрузке — условное обозначение S1.

Номинальные мощности. Номинальные мощности электрических машин переменного и постоянного тока (двигателей и генераторов) регламентированы ГОСТ 12139 — 84, публикации МЭК 72 в части номинальных мощностей. Согласно ГОСТ номинальные мощности должны соответствовать работе электрических машин при номинальных значениях напряжения, частоты вращения, частоты переменного тока, коэффициента мощности, а также при условиях и режимах работы, установленных соответствующими стандартами.

Стандартом предусмотрены следующие значения номинальных мощностей (в пределах от 0,12 до 1000 кВт): 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000 кВт. Эти значения мощностей обязательны для всех исполнений электрических машин по защите и по монтажу, а также для всех способов охлаждения. Для машин специализированного назначения (рольганговые, краново-металлургические и др.) указанные значения мощностей не обязательны.

Номинальные напряжения. Номинальные напряжения генераторов и двигателей до 1000 В регламентированы ГОСТ 21128 — 83, а свыше 1000 В — ГОСТ 721 — 77. В стандартах учтены Публикации МЭК 38(1975). Стандартом установлены наиболее широко применяемые номинальные напряжения (В):

Род тока	Переменный трехфазный					Постоянный		
Генератор	230	400	690	6300	10500	115	230	460
Двигатель	220	380	660	6000	10000	110	220	440

Номинальные частоты вращения. Номинальные частоты вращения электрических машин регламентированы ГОСТ 10683 — 73. Установлены следующие номинальные частоты вращения при частоте переменного тока 50 Гц для синхронных генераторов: 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000

об/мин. Эта шкала используется также для синхронных и асинхронных двигателей с некоторыми изменениями.

Так, для асинхронных двигателей добавлены частоты вращения 120 и 166 об/мин, а исключены 214,3 и 428,6 об/мин. Номинальные частоты вращения асинхронных двигателей должны быть меньше перечисленных на частоту вращения, определяемую величиной номинального скольжения.

Степени защиты от внешних воздействий. Электрические машины могут иметь различные исполнения по защите от внешних воздействий, которые, с одной стороны, должны обеспечить защиту обслуживающего персонала от прикосновения к токоведущим или вращающимся частям, а с другой — защиту машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел и воды. Обозначения степени защиты регламентируются ГОСТ 14254 — 96, в стандарте учтены требования рекомендаций Публикации МЭК 34 — 5.

Согласно указанному стандарту обозначение степеней защиты состоит из букв IP — начальные буквы английских слов International Protection (международное обозначение степеней защиты) и следующих за ними цифр. Первая цифра характеризует степень защиты от прикосновения и от проникновения твердых тел в машину. Более распространенными являются следующие степени защиты по первой характеристической цифре:

2 — защита от возможностей соприкосновения пальцев с токоведущими или движущимися частями внутри машины. Защита машины от попадания внутрь ее твердых посторонних тел диаметром более 12 мм;

4 — защита от соприкосновения инструмента, проволоки или других подобных предметов, толщина которых превышает 1 мм, с токоведущими или движущимися частями внутри машины*. Защита машины от попадания внутрь ее легких твердых посторонних тел диаметром более 1 мм.

Вторая цифра характеризует степень защиты машины от проникновения воды. Более распространенными являются следующие степени защиты по второй характеристической цифре:

2 — защита от капель воды. Капли воды, падающие под углом в пределах до 15° к вертикали, не должны оказывать на машину вредного действия;

3 — защита от дождя. Вода, падающая на машину в виде дождя под углом в пределах до 60° к вертикали, не должна оказывать на машину вредного действия;

4 — защита от брызг. Брызги воды любого направления, попадающие на машину, не должны оказывать на нее вредного действия.

Наибольшее применение находят следующие степени защиты:

---

*Если машина охлаждается внешним вентилятором, то вентилятор должен быть защищен от соприкосновения с ним пальцев как на стороне входа, так и на стороне выхода охлаждающего воздуха.

IP22 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от капель воды (защищенная машина);

IP23 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 12 мм и от дождя (защищенная машина);

IP44 — машина, защищенная от попадания твердых тел размером более 1 мм и от водяных брызг (закрытая машина).

Способы охлаждения. Обозначения способов охлаждения регламентируются ГОСТ 20459 — 87, учитывающим рекомендации Публикации МЭК 34 — 6. Согласно этому стандарту обозначение способов охлаждения состоит из букв IC — начальные буквы английских слов International, Cooling (международное обозначение способов охлаждения) и следующей за ними характеристики цепей охлаждения. Последняя состоит из прописной буквы, условно обозначающей вид хладоагента и следующих за ней двух цифр; при охлаждении воздухом буква опускается. Первая цифра условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладоагента, вторая — способ его перемещения. Из указанных в стандарте более распространенными являются следующие условные обозначения цепей:

Условные обозначения устройства цепи (первая цифра):

0 — свободная циркуляция;

1 — охлаждение с помощью подводящей трубы;

3 — охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб;

4 — охлаждение с помощью наружной поверхности машины;

5 — охлаждение с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

6 — охлаждение с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды).

Условные обозначения способа передвижения хладоагента (вторая цифра):

0 — свободная конвекция;

1 — самовентиляция;

3 — перемещение хладоагента с помощью пристроенного зависимого устройства;

5 — перемещение хладоагента с помощью встроенного независимого устройства;

6 — перемещение хладоагента с помощью пристроенного независимого устройства;

7 — перемещение хладоагента с помощью отдельного и независимого устройства.

Если машина имеет две или более цепей охлаждения, то в обозначении указывают характеристики всех цепей охлаждения, начиная с характеристики цепи с вторичным хладоагентом (с более низкой температурой). Чаще применяют следующие способы охлаждения, обозначения которых будут использованы в книге.

Способы охлаждения:

IC01 — защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины;

IC0141 — закрытая машина, обдуваемая наружным вентилятором, расположенным на валу машины;

IC0641 — закрытая машина, обдуваемая наружным пристроенным вентилятором с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC0041 — закрытая машина с естественным охлаждением;

IC0151 — закрытая машина с охлаждением с помощью встроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC0161 — закрытая машина с охлаждением с помощью пристроенного охладителя (с использованием окружающей среды);

IC13 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое пристроенным зависимым устройством;

IC17 — защищенная машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей трубы, осуществляемое отдельным и независимым устройством;

IC05 — то же, охлаждение с помощью встроенного вентилятора с приводным электродвигателем, установленным на машине и питаемым независимо от охлаждаемой машины;

IC06 — то же, охлаждение с помощью пристроенного двигателя-вентилятора, питаемого независимо от охлаждаемой машины;

IC37 — закрытая машина с независимой вентиляцией; охлаждение с помощью подводящей и отводящей труб, осуществляемое отдельным и независимым устройством.

В дальнейшем изложении для машин с независимой вентиляцией будет приводиться ссылка только на способы охлаждения IC17 и IC37, поскольку все перечисленные способы независимой вентиляции практически равноценны по эффекту охлаждения.

Исполнения по способу монтажа. Формы исполнения по способу монтажа и их условные обозначения регламентируются СТ 246 — 76, учитывающим рекомендации Публикации МЭК 34 — 7. Согласно стандарту обозначение формы исполнения по способу монтажа состоит из букв IM — начальные буквы английских слов International Mounting (международное обозначение исполнений по способу монтажа) и следующих за ними цирф. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения, например, цифра 1 — машину на лапах с одним или двумя подшипниковыми щитами; 2 — то же, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах); 3 — машину без лап с одним или двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите и т. д.

Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, например при группе конструктивного исполнения 1 цифры 00 — машину с горизонтально направленным концом вала и креплением к фундаменту лапами, 01 — с вертикально направленным концом вала вниз и креплением к стене лапами; при группе 3 цифры 01

соответствуют вертикально направленному концу вала вниз и креплению к фундаменту фланцем и т. д. Четвертая цифра обозначает исполнение вала, например цифра 1 — машину с одним цилиндрическим концом вала; 2 — то же, с двумя цилиндрическими концами вала, и т. д.

Наиболее распространенными исполнениями по способу монтажа являются IM1001 — машина с двумя подшипниковыми щитами на лапах, с одним горизонтально направленным цилиндрическим концом вала; IM1011 — то же, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала; IM3011 — машина с двумя подшипниковыми щитами без лап, с фланцем на одном подшипниковом щите, с вертикально направленным вниз одним цилиндрическим концом вала.

Климатические условия работы. Конструкция и исполнение машин должны предусматривать способность противостоять в условиях эксплуатации воздействию климатических факторов внешней среды. ГОСТ 15150 — 69 и 15543 — 70 регламентируют исполнение машин, категории их размещения, условия эксплуатации, хранения и транспортирования с учетом воздействия климатических факторов (температуры, влажности, пыли, солнечной радиации, интенсивности дождя и т. п.).

Каждому климатическому исполнению машин присвоено буквенное обозначение, например для районов с умеренным климатом — У, с холодным климатом — ХЛ и т. д.

Категория размещения машин имеет цифровое обозначение, например при наиболее благоприятных условиях, когда машина предназначена для установки в закрытых отапливаемых и вентилируемых производственных или других помещениях, категория размещения обозначается цифрой 4; категория размещения машины, предназначенной для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, обозначается цифрой 3.

Цифровое обозначение категории размещения следует за буквенным, характеризующим условия климата. Например, исполнение машины, предназначенной для районов с умеренным климатом при категории размещения 4, имеет условное буквенно-цифровое обозначение У4.

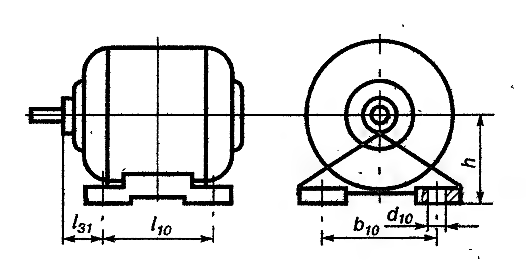


Рис. 1.1. К определению установочных и присоединительных размеров

Установочные и присоединительные размеры. Высоты оси вращения h электрических машин с горизонтальной осью вращения, равные расстоянию от оси вращения до

опорной плоскости машины, регламентированы ГОСТ 13267 — 73, который соответствует Публикациям МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р496.

К каждому значению h привязаны установочные и присоединительные размеры (рис. 1.1), регламентированные ГОСТ 18709 — 73 для $h=56\div400$ мм и ГОСТ 20839 — 75 для $h>400$ мм. В стандартах также учтены рекомендации Публикаций МЭК 72, МЭК 72А и ИСО Р775. Стандартизованные значения h и связанные с ними установочно-присоединительные размеры (мм) приведены в табл. 1.1 для $h=56\div400$ мм и в табл. 1.2 для $h>400$ мм.

Таблица 1.1

h	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}	h	b_{10}	l_{10}	l_{31}	d_{10}
56	90	71	36	5,8	200	318	228 267 305	133	19
63	100	80	40	7					
71	112	90	45	7					
80	125	100	50	10	225	356	286 311 356	149	19
90	140	100 125	56	10					
100	160	112 140	63	12	250	406	311 349 406	168	24
112	190	114 140 159	70	12	280	457	368 419 457	190	24
132	216	140 178 203	89	12	315	508	406 457 508	216	28
160	254	178 210 254	108	15	355	610	500 560 630	254	28
180	279	203 241 279	121	15	400	683	560 630 710 800 900	280	35

Таблица 1.2

h	b_{10}	l_{10}	d_{10}
450	710; 800; 900; 1000; 1120;	355; 400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250;	35
500	800; 900; 1000; 1120; 1250;	400; 450; 500; 560; 630; 710; 800; 900; 1000; 1120; 1250; 1400	42

Размер l_{31} (независимо от h) выбирают из следующего ряда: 0; 100; 200; 224; 250; 280; 315; 335; 355; 375; 400; 425; 450; 475; 500; 530; 560; 600; 630; 670; 710; 750; 800; 900; 1000 мм.

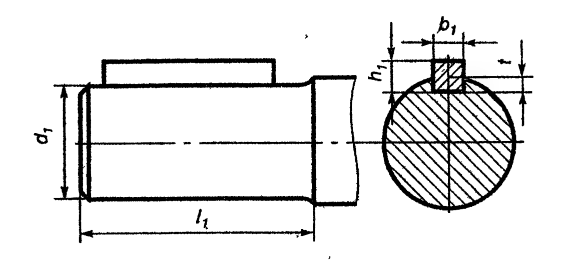


Рис. 1.2. К определению размеров выступающих цилиндрических концов валов

ГОСТ 18709 — 73 и 20839 — 75 регламентируют размеры выступающих цилиндрических концов валов (рис. 1.2).

Длина выступающего конца вала, размеры призматической шпонки и шпоночного паза, а также наибольший допускаемый момент вращения M, связанные с диаметром выступающего цилиндрического конца вала, приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м	d_1	l_1	b_1	h_1	t	M, Н·м
мм						мм					
7	16	2	2	1,2	0,25	55	110	16	10	6	355
9	20	3	3	1,8	0,63	60	140	18	11	7	450
11	23	4	4	2,5	1,25	65	140	18	11	7	630
14	30	5	5	3	2,8	70	140	20	12	7,5	800
16	40	5	5	3	4,5	75	140	20	12	7,5	1000
18	40	6	6	3,5	7,1	80	170	22	14	9	1250
19	40	6	6	3,5	8,25	85	170	22	14	9	1600
22	50	6	6	3,5	14	90	170	25	14	9	1900
24	50	8	7	4	18	95	170	25	14	9	2360
28	60	8	7	4	31,5	100	210	28	16	10	2800
32	80	10	8	5	50	110	210	28	16	10	4000
38	80	10	8	5	90	120	210	32	18	Ц	5300
42	110	12	8	5	125	130	250	32	18	11	7400
48	110	14	9	5,5	200						

Примечания: 1. Наибольший допустимый момент вращения для $d_1 \leqslant 110$ мм указан по рекомендациям МЭК для электродвигателей переменного тока при продолжительном режиме работы (S1). 2. Значения l_1 в таблице соответствуют длинным выступающим концам валов в перечисленных выше стандартах.

Предельные отклонения на установочные и присоединительные размеры регламентированы ГОСТ 13267 — 73 и 8592 — 79:

Высота h, мм	свыше 50 до 250	свыше 250 до 650
Предельные отклонения, мм	−0,5	−1,0

Допускаемые отклонения для размеров b_{10} и l_{10} составляют 0,3z, где z — диаметральный зазор, определяемый как разность

между номинальными диаметрами отверстия d_{10} и крепежной детали.

Пределы отклонения размеров l_{31} не должны превышать следующих значений:

Номинальный диаметр вала d_1, мм	свыше 6 до 10	свыше 10 до 25	свыше 25 до 45	свыше 45 до 60	свыше 60 до 220
Предельные отклонения размера l_{31}, мм	±1,0	±1,5	±2,0	±3,0	±4,0

Предельные отклонения диаметров цилиндрических концов валов должны соответствовать следующим данным:

Номинальный диаметр вала d_1, мм	7 до 10	свыше 10 до 18	свыше 18 до 30	свыше 30 до 50	свыше 50 до 80	свыше 80 до 110
Предельные отклонения размера d_1, мм:						
верхние	+0,007	+0,008	+0,009	+0,018	+0,030	+0,035
нижние	−0,002	−0,003	−0,004	+0,002	+0,011	+0,013

1.3. Особенности проектирования серий машин

Серия представляет собой ряд электрических машин со стройно нарастающими основными параметрами — мощностью и геометрическими размерами. Машины, входящие в серию, характеризуются общностью назначения и условий работы и имеют принципиальное подобие конструкции по всей серии или по ее участкам. Серия состоит из отдельных *типоразмеров*, под которыми понимаются электрические машины с определенными параметрами (мощность, частота вращения и т. п.) и монтажно-присоединительными размерами.

Чем меньше количественный выпуск машин, тем экономичнее увеличение в каждом наружном диаметре корпуса или станины количества длин корпусов. Практикой установлено, что применяют главным образом две длины корпуса на диаметр и только когда для данного диаметра получаются недопустимо длинные сердечники у машин второй длины, принимают одну длину, а при больших мощностях — три-четыре длины. В серии должны быть предусмотрены машины для всех необходимых частот вращения и напряжений. При проектировании серий задается шкала мощностей, значения которых должны соответствовать стандартному ряду. В серии также осуществляют необходимые электрические и конструктивные модификации, выполняемые на базе машин основного исполнения.

У машин переменного тока данного типоразмера переход от одного числа полюсов к другому влияет на требуемую длину сердечника, однако корпуса́, а следовательно, и другие элементы конструкции машин при разных числах полюсов следует унифицировать. Осуществлению такой унификации способствует то, что обычно

имеющему место нарастанию длины сердечника при переходе от меньшего числа полюсов к большему сопутствует укорочение вылетов лобовых частей обмоток.

Листы статора одного и того же типоразмера имеют одинаковый наружный диаметр при разных числах полюсов. Внутренние диаметры листов при $2p=2$, 4 и 6 обычно различные, однако при $2p \geq 8$ диаметры для соседних значений $2p$ целесообразно объединять, так как при этом уменьшается число различных штампов, а изменение магнитной индукции в спинке статора многополюсных машин за счет ее высоты незначительно.

1.4. Единые серии асинхронных двигателей

Общие сведения. Асинхронные двигатели — наиболее распространенный вид электрических машин, потребляющих в настоящее время около 40% всей вырабатываемой электроэнергии. Их установленная мощность постоянно возрастает.

Потребности народного хозяйства удовлетворяются главным образом двигателями основного исполнения единых серий общего назначения, т. е. применяемых для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению, энергетическим показателям, шуму и т. п. Вместе с тем в единых сериях предусматривают также электрические и конструктивные модификации двигателей, модификации для разных условий окружающей среды, предназначенные для удовлетворения дополнительных специфических требований отдельных видов приводов и условий их эксплуатации. Модификации создаются на базе основного исполнения серий с максимально возможным использованием узлов и деталей этого исполнения.

В некоторых приводах возникают требования, которые не могут быть удовлетворены двигателями единых серий. Для таких приводов созданы специализированные двигатели, например электробуровые, краново-металлургические и др.

Разработанное в России и внедренное в производство основное исполнение единой серии подразделяется на два основных ряда: серию с $h=50-355$ мм (мощностью от 0,12 до 400 кВт при $2p=4$) и серию с $h=400-450$ мм (мощностью от 400 до 1000 кВт при $2p=4$).

Серия 4А. Основное исполнение серии. Двигатели выполняются с короткозамкнутым (при $h=50-355$ мм) и с фазным роторами (при $h=200-355$ мм). По степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения различают: закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141) при $h=50-355$ мм; защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при $h=160-355$ мм.

Двигатели мощностью от 0,12 до 0,37 кВт изготовляют на номинальные напряжения 220 и 380 В, со схемой соединения обмоток статора Δ или Y; эти двигатели имеют три выводных провода. Двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт, кроме того, выполняют на напряжение 660 В (при тех же схемах соединения и количестве выводных проводов). Двигатели мощностью от 15 до 110 кВт изготовляют на номинальные напряжения 220/380 и 380/660 В, а от 132 до 400 кВт — только на 380/660 В; эти двигатели имеют схему соединения Δ/Y и шесть выводных проводов. Двигатели с $h=50-132$ мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В; остальные — с изоляцией класса F. Общие технические данные на указанные двигатели регламентированы ГОСТ 19523—74.

Модификации серии 4А при $h=50-355$ мм. На базе основного исполнения серии изготовляются следующие *электрические модификации*:

двигатели с повышенным пусковым моментом ($h=160-250$ мм), предназначенные для привода механизмов, имеющих большие статические и инерционные нагрузки в момент пуска (компрессоры, конвейеры, насосы, поворотные круги и т. д.);

двигатели с повышенным скольжением ($h=71-250$ мм) — для работы в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками или с пульсирующей нагрузкой (штамповочные прессы, молоты, поршневые компрессоры и т. д.);

многоскоростные двигатели ($h=56-355$ мм) на две, три и четыре частоты вращения для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения (металлообрабатывающие станки, механические колосниковые решетки, некоторые виды лебедок и т. д.);

двигатели на частоту 60 Гц ($h=50-355$ мм) — для работы от сети с указанной частотой.

Серия охватывает следующие *конструктивные модификации*:

малошумные двигатели ($h=56-160$ мм) — для работы в приводах с повышенными требованиями к уровню шума;

встраиваемые двигатели ($h=50-250$ мм) — для встраивания в станки и механизмы (двигатели поставляются в виде обмотанного сердечника статора и ротора);

двигатели со встроенной температурной защитой ($h=50-355$ мм) — для привода механизмов, работающих со значительными перегрузками, частыми пусками и т. д.

Серия охватывает следующие *модификации по условиям окружающей среды*:

двигатели тропического исполнения ($h=50-355$ мм) — для работы в условиях влажного или сухого тропического климата при температуре окружающего воздуха от −10 до +45 °С, относительной влажности до 100% (при температуре +35 °С), при воздействии солнечной радиации, песка, пыли и плесневых грибков;

двигатели влагоморозостойкого исполнения (h=50—355 мм) — для работы при температуре окружающей среды до −40 °С и относительной влажности 100% (при температуре +25 °С);

двигатели химостойкого исполнения (h=50—355 мм) — для работы при температуре окружающей среды в пределах ±40 °С, относительной влажности 80% (при температуре +25 °С), наличии химически активной невзрывоопасной среды.

Серия А4. Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения:

защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при h=400 и 450 мм;

закрытое исполнение (IP44) с охлаждением с помощью воздухоохладителя (IC0161) при h=400 и 450 мм.

Двигатели изготовляют с короткозамкнутым или фазным ротором и на номинальное напряжение 6000 В. Обмотка статора имеет шесть выводных проводов, соединенных в звезду, и выполняется с термореактивной изоляцией типа «Монолит» класса нагревостойкости F, с температурным использованием на уровне класса В. Обмотка фазного ротора имеет изоляцию класса нагревостойкости В.

Глава 2
МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

2.1. Электроизоляционные материалы

Улучшение технико-экономических показателей проектируемых электрических машин в значительной степени определяется применением усовершенствованных материалов, в том числе электроизоляционных. Главные требования, предъявляемые к электроизоляционным материалам,— надлежащая нагревостойкость, электрическая и механическая прочность и как можно меньшая толщина.

Развитие электромашиностроения в течение последних десятилетий сопровождается повышением нагревостойкости используемых электроизоляционных материалов. Электрические машины с изоляцией класса нагревостойкости А в настоящее время практически не изготовляются, а класс Е находит ограниченное применение в малых машинах. Конструкция электроизоляции современных электрических машин базируется главным образом на материалах классов нагревостойкости В и F. Специальные машины и машины, работающие в относительно тяжелых условиях (металлургия, шахты и т. п.), выполняют с электроизоляционными материалами класса нагревостойкости Н.

По своему назначению электроизоляционные материалы подразделяют на:

материалы, к которым предъявляют в первую очередь требования высокой электрической прочности, например материалы, изолирующие катушки обмоток;

материалы, которые должны защищать основные электроизоляционные материалы от механических воздействий, например материалы для выкладки пазов. К таким материалам в первую очередь предъявляют требования высокой механической прочности.

В зависимости от их структуры электроизоляционные материалы подразделяют на следующие основные группы:

а) неорганические волокнистые материалы, основа которых — стекловолокно или асбест. Стекловолокнистые материалы обладают большой механической прочностью на разрыв, малой гигроскопичностью и высокой нагревостойкостью, класс которой определяется пропитывающими лаками. Недостатком стекловолокнистых материалов является их пониженная стойкость к изгибу и истиранию. Асбест используют в виде асбестовой бумаги, обладающей высокой нагревостойкостью, но имеющей низкую механическую прочность на разрыв;

б) слюдяные материалы, базирующиеся на щепаной или дробленой слюде, обладают высокими показателями по электрической и механической прочности, нагревостойкости, влагостойкости. Различают три основных вида слюдяных материалов — миканиты, слюдиниты и слюдопласты. Последние два вида материалов находят все большее распространение, вытесняя миканиты, для изготовления которых необходима дефицитная щепаная слюда;

Таблица 2.1

Группа	Наименование материала	Класс нагревостойкости
Неорганические волокнистые материалы	Стеклолакоткань Лента стеклянная Лента нетканая стекловолокнистая Бумага асбестовая	B, F, H B, F, H B, F B, F
Слюдяные материалы	Микалента Миканит прокладочный Миканит формовочный Миканит коллекторный Лента стеклослюдинитовая Слюдопластофолий Лакотканеслюдопласт	B, F, H B, F, H B, F, H B, F, H B, F B B, F, H
Синтетические пленки и бумаги	Пленка полиамидная Пленкосинтокартон Пленкостеклопласт «Изофлекс» Пленкостеклопласт «Имидофлекс»	F, H B, F, H B F, H
Вспомогательные материалы	Стеклотекстолит Электронит Бумага телефонная Пластмасса К6 Пластмасса АГ4С	B, F, H B, F B B F

в) пленочные и бумажные изоляционные материалы из синтетических смол, находящиеся в стадии развития и улучшения. Эти материалы обладают высокими нагревостойкостью, электрической и механической прочностью при малой толщине; они перспективны для применения в современных электрических машинах. К этой группе материалов относятся, кроме указанных в табл. 2.1, также фенилоновая бумага и синтофолий классов нагревостойкости F и H, осваиваемые в настоящее время отечественной промышленностью;

г) вспомогательные материалы, используемые для механического крепления обмоток или отдельных сборочных единиц электрических машин.

Марки перечисленных изоляционных материалов (в зависимости от класса нагревостойкости изоляции) приведены в приложениях 17 — 22 вместе с данными по конструкции изоляции обмоток электрических машин.

2.2. Проводниковые материалы

Для обмоток электрических машин применяют в основном медные провода, изолированные стекловолокном или эмалью, а также неизолированные медные ленты и шины, дополнительно изолируемые при изготовлении обмоток.

Из проводов со стекловолокнистой изоляцией распространены круглые и прямоугольные провода марок ПСД и ПСДТ класса нагревостойкости F, ПСДК и ПСДКТ класса нагревостойкости H. Буква Т в конце обозначения марки провода указывает на утоньшенную изоляцию провода.

Из проводов с эмалевой изоляцией используют главным образом круглые провода марки ПЭТВ и прямоугольные марки ПЭТВП; нагревостойкость изоляции этих проводов соответствует классу В. Для обмоток электрических машин с изоляцией класса нагревостойкости F применяют круглые провода ПЭТ-155 и прямоугольные ПЭТП-155, а при классе нагревостойкости H — круглые провода ПЭТ-200 и прямоугольные провода ПЭТП-200.

По сравнению с проводами, изолированными стекловолокном, эмалированные провода обладают рядом преимуществ — меньшей толщиной, большей теплопроводностью и влагостойкостью изоляции. Вместе с тем они имеют пониженную стойкость к тепловым ударам и к действию растворителей. Несмотря на указанные недостатки, эмалированные провода постепенно вытесняют провода со стекловолокнистой изоляцией.

Для выводов электрических машин при изоляции классов нагревостойкости B, F и H применяют в основном кабель РКГМ по ГОСТ 16036 — 79, обладающий гибкостью, так как его жила состоит из тонких медных проволок, а изоляция эластична.

Для литой беличьей клетки короткозамкнутых роторов используют алюминий А5 по ГОСТ 11069 — 74 или алюминиевый сплав АКМ12-4 (в клетках роторов асинхронных двигателей с повышенным скольжением), для сварной — прямоугольные алюминиевые прессованные шины АДО по ГОСТ 15176 — 70.

2.3. Электротехнические стали

Для листов сердечников электрических машин используют тонколистовую электротехническую сталь по ГОСТ 21427.2 — 83 и 21427.3 — 75. Указанные стандарты распространяются на горячекатаную и холоднокатаную сталь разных марок. Обозначение марок стали по ГОСТ 21427.2 — 83 состоит из четырех цифр, условно характеризующих основные свойства стали: первая — класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 — горячекатаная изотропная*, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой); вторая — содержание кремния (0 — нелегированная, 1 — с содержанием кремния свыше 0,4 до 0,8% включительно, 2 — свыше 0,8 до 1,8% включительно, 3 — свыше 1,8 до 2,8% включительно, 4 — свыше 2,8 до 3,8% включительно, 5 — свыше 3,8 до 4,8% включительно); третья — по основной нормируемой характеристике (например, удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц, обозначаемые в стандарте $p_{1,5/50}$); четвертая — порядковый номер типа стали.

Раньше для сердечников, подвергающихся перемагничиванию (статор, ротор), применялась горячекатаная изотропная электротехническая сталь 1212 (Э12)**, 1312 (Э22) и 1412 (Э32) по ГОСТ 21427.3 — 75, поставляемая в виде листов стандартных размеров.

В настоящее время эта сталь снята с производства, она заменена холоднокатаной изотропной электротехнической сталью по ГОСТ 21427.2 — 75, обладающей более высокой магнитной проницаемостью, пониженными удельными потерями при перемагничивании, малыми разнотолщинностью и разноплоскостностью в сравнении с горячекатаной сталью. При толщине листов в 0,5 мм коэффициент заполнения сердечников, собираемых из холоднокатаной стали, повышается до 0,97. Холоднокатаная сталь поставляется также в рулонах и резаных лентах, что позволяет внедрять на электромашиностроительных заводах автоматический процесс штамповки. Согласно ГОСТ 21427.2 — 75 рулонную сталь изготовляют шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

---

*Изотропная сталь обладает относительно малой разницей магнитной проводимости в направлении и поперек проката в отличие от анизотропной, имеющей резко отличающуюся магнитную проводимость в указанных направлениях.

**В скобках указаны ранее применявшиеся обозначения марок стали по отмененному ГОСТ 802 — 51 и 9925 — 61.

При относительно небольшом выпуске проектируемых машин выбор наружных диаметров сердечников статора машин переменного тока следует ориентировать на рулонную сталь стандартной ширины, учитывая при этом минимально допустимые припуски на штамповку.

Резаную ленту изготовляют шириной 90, 95, 107, 123, 138, 140, 150, 156, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 300, 322, 325, 360, 400, 445 и 500 мм, однако по соглашению потребителя с изготовителем допускается изготовлять ленту другой ширины. Поэтому при больших количествах выпускаемых машин целесообразно ориентироваться на применение резаных лент шириной, необходимой для обеспечения оптимальных показателей проектируемых машин.

Листы изготовляют следующих размеров: 500×1500, 750×1500, 1000×2000 мм.

Чем больше мощность электрической машины, тем выше отношение потерь в стали к сумме потерь в машине. Чтобы это отношение не превышало определенного, установленного практикой предела (обычно около 0,25), для машин большей мощности следует применять сталь с меньшими удельными потерями.

Рекомендуемые марки стали в зависимости от величины машин приведены в гл. 6. К ним относятся стали 2013, 2312 и 2411. Кроме ГОСТ 21427.2 — 83 предусмотрены стали 2011, 2012, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2412.

Холоднокатаная изотропная сталь для стабилизации магнитных свойств требует после проката термической обработки (отжига), осуществляемой на металлургических заводах. Стандартом предусмотрена также поставка указанной стали с термостойким электроизоляционным покрытием. Исключением является сталь 2013, которая поставляется без термической обработки, так как из-за высокой пластичности в отожженном состоянии при штамповке образуются большие заусенцы. Поэтому отштампованные листы из стали 2013 должны подвергаться термообработке на электромашиностроительном заводе в специальных печах в защитной атмосфере, а затем оксидированию в атмосфере водяного пара или воздуха для получения на поверхности листов изоляционного слоя (более подробно этот вопрос рассмотрен в части III, гл. 2).

Глава 3

КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Вал

Вал асинхронного двигателя служит для передачи вращающего момента электродвигателя к приводимому механизму. Вал несет на себе массу вращающейся части машины и нагружен моментом вращения и изгибающим моментом передачи.

Основные требования, предъявляемые к валу: жесткость в средней части, несущей сердечник ротора, с тем, чтобы при работе машины прогиб вала не достигал недопустимых значений; прочность во всех его поперечных сечениях, достаточная для того, чтобы выдерживать без остаточных деформаций все нагрузки, возникающие при эксплуатации машины; превышение первой критической частоты вращения над рабочей не менее чем на 30%.

Соответствие вала проектируемой машины указанным требованиям проверяется механическим расчетом после построения продольного разреза машины.

Размеры вала (рис. 3.1) определяют при разработке конструкции машины, начиная с диаметра d_1 и длины выступающего цилиндрического конца вала l_1, которые принимают в зависимости от момента вращения при номинальном режиме работы машины согласно табл. 1.3 (все размеры в мм). Номинальный момент вращения (Н·м) двигателя

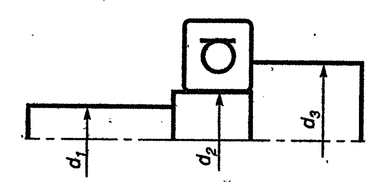


Рис. 3.1. К определению размеров вала

$$M_2 = 9{,}55 P_2 / n, \tag{3.1}$$

где P_2 — номинальная мощность, Вт; n — номинальная частота вращения, об/мин.

Диаметр вала под подшипник d_2 и диаметр вала за подшипником d_3 принимают в зависимости от выбранного наружного диаметра выступающего конца вала d_1 согласно данным табл. 3.1.

Таблица 3.1

d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
7	8	12	32	35	44	75	80	92
9	10	15	38	40	49	80	85	99

d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
11	12	17	42	45	54	85	90	104
14	15	20	48	50	60	90	95	109
16	17	22	55	60	72	95	100	114
19	20	26	60	65	77	100	105	119
24	25	32	65	70	82	110	120	134
28	30	37	70	75	87	120	138	148

Валы диаметром в средней части до 100 мм изготовляют преимущественно из прокатанных цилиндрических прутков стали 45, но могут использоваться и другие марки; такие валы проектируют с минимальными возможными переходами от одной ступени к другой, чтобы уменьшить трудоемкость механической обработки и количество отходов. Для изготовления валов с большим диаметром применяют заготовки также из стали 45, получаемые методом ковки или прессовки.

На выступающем конце вала фрезеруют шпоночную канавку, ширину и глубину которой принимают по табл. 1.3. Шпоночные канавки фрезеруют также и на других участках вала — в месте расположения сердечника, вентилятора. Для унификации на перечисленных участках вала целесообразно применять шпоночные канавки таких же размеров, как на выступающем конце вала. У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при $h \leqslant 250$ мм сердечник ротора насаживают на вал с прессовой посадкой с нагревом без шпонки. У асинхронных двигателей с фазным ротором в валу просверливают центральное отверстие для размещения кабелей или шин, соединяющих обмотку с контактными кольцами.

3.2. Сердечник и обмотка ротора

Штамповка листов ротора асинхронных двигателей производится из высечки листов статора. На листах ротора создают изолирующую оксидную пленку путем термической обработки отдельных штампованных листов у двигателей с $h \leqslant 250$ мм или собранного сердечника у двигателей с $h > 250$ мм.

Сердечник короткозамкнутого ротора двигателей с $h \geqslant 160$ мм набирают из отштампованных листов на центрирующую оправку по специальному знаку, прессуют и без снятия давления закрепляют на оправке, после чего сердечник поступает на заливку алюминием. Сердечник ротора двигателей с $h \leqslant 132$ мм сваривают на полуавтоматах внутренним швом, затем их заливают алюминием без применения специальной оправки. После заливки сердечники роторов двигателей с $h \leqslant 250$ мм насаживают на вал без шпонки

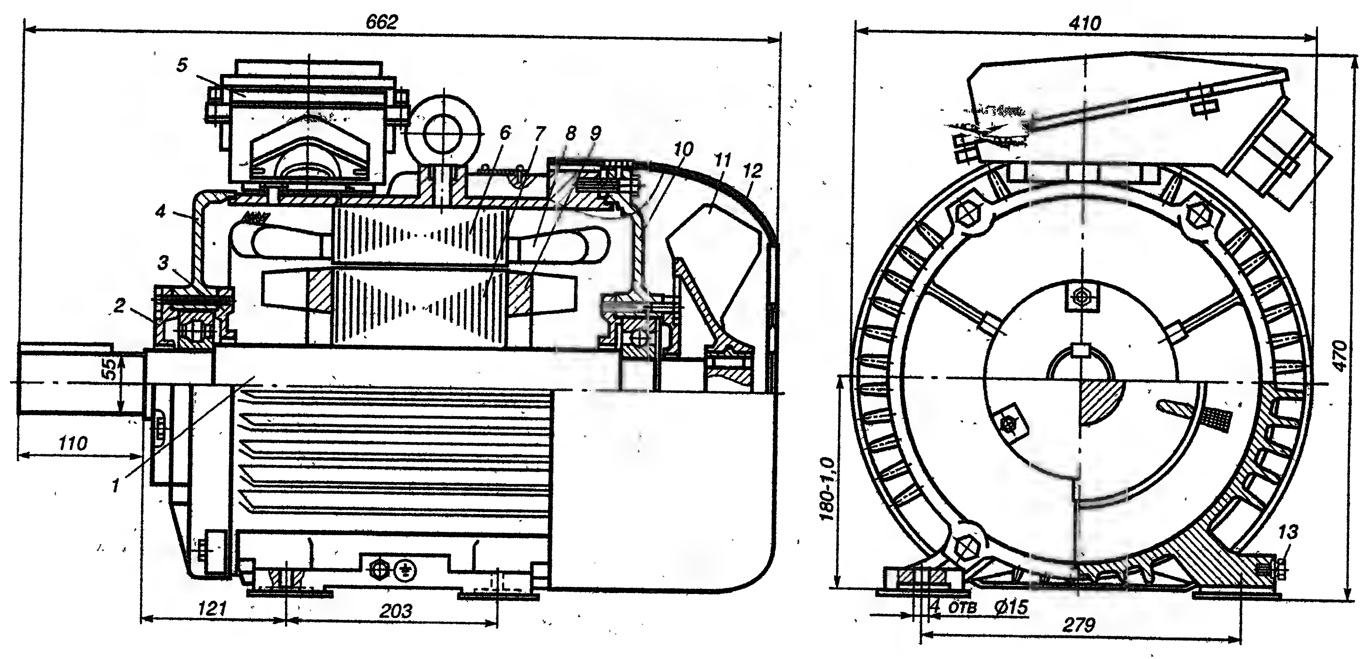


Рис. 3.2. Общий вид асинхронного двигателя с высотой оси вращения $h = 180$ мм; степень защиты IP44; способ охлаждения IC0141; 22 кВт, 220/380 В; $2p = 4$; ротор короткозамкнутый:

1 — вал; *2* — крышка подшипниковая наружная; *3* — крышка подшипниковая внутренняя; *4* — щит подшипниковый; *5* — коробка выводов; *6* — сердечник статора; *7* — сердечник ротора; *8* — обмотка статора; *9* — обмотка ротора; *10* — щит подшипниковый; *11* — вентилятор; *12* — кожух вентилятора; *13* — болт заземления

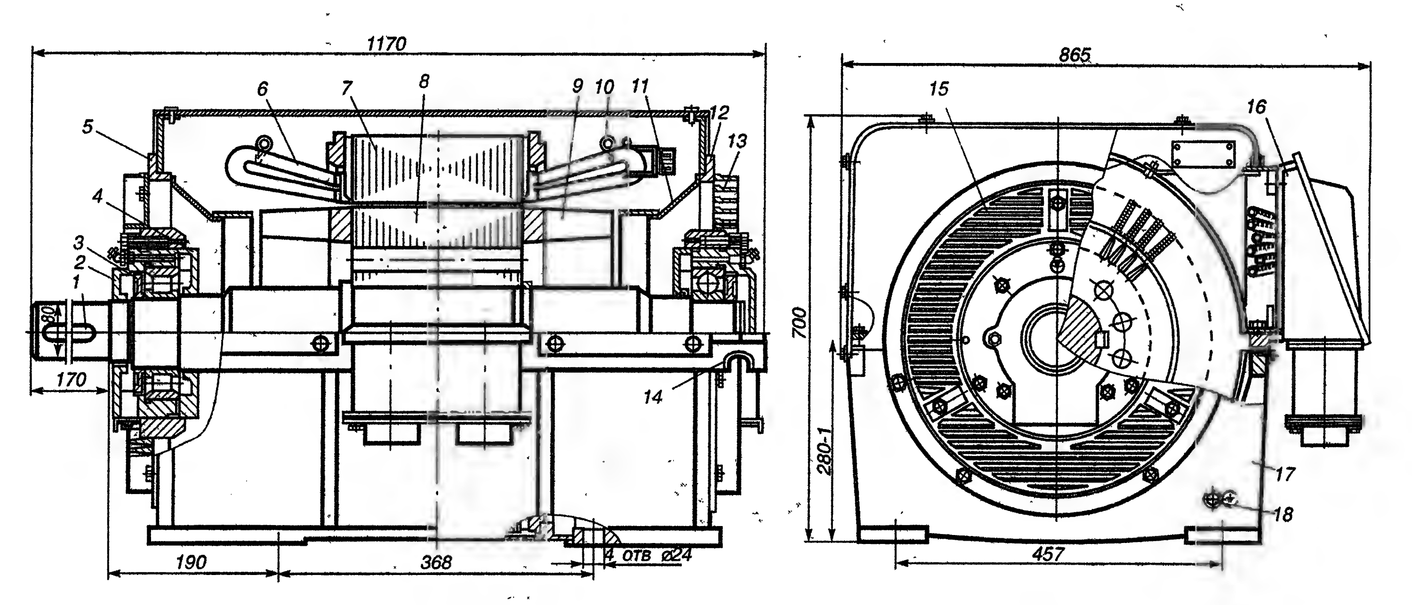


Рис. 3.3. Общий вид асинхронного двигателя с высотой оси вращения $h = 280$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC01; 110 кВт; 380/660 В; $2p = 4$, ротор короткозамкнутый;

1 — вал; *2* — капсула подшипника; *3* — шайба, сбрасывающая отработанную смазку; *4* — крышка подшипниковая внутренняя; *5* — щит подшипниковый; *6* — обмотка статора; *7* — сердечник статора; *8* — сердечник ротора; *9* — обмотка ротора; *10* — кольцо бандажное; *11* — щиток, направляющий воздух; *12* — щит подшипниковый; *13* — жалюзи; *14* — крюк транспортный; *15* — кожух; *16* — коробка выводов; *17* — полустанина; *18* — болт заземления

в нагретом состоянии (рис. 3.2), а у двигателей с $h>250$ мм — на вал со шпонкой при прессовой посадке (рис. 3.3).

Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей $h \geqslant 400$ мм выполняют со сварной алюминиевой клеткой. С листов роторов снимают заусенцы, затем покрывают изолирующим лаком, после чего листы набирают непосредственно на вал. Собранный сердечник, размещенный между нажимными шайбами, прессуется и закрепляется с одной стороны упорным заплечиком вала, с другой — кольцевой шпонкой.

Сердечники фазных роторов выполняют таким же образом, как и у короткозамкнутых роторов со сварной клеткой; при этом нажимные шайбы ротора имеют приливы, являющиеся обмоткодержателями, на которые опираются лобовые части обмотки (рис. 3.4). При наличии радиальных вентиляционных каналов в роторе их располагают против соответствующих каналов в сердечнике статора. Крепят вентиляционные распорки ротора особо тщательно, чтобы исключить возможность их выпадения при вращении ротора. Изготовленный сердечник ротора с валом протачивают по наружному диаметру для обеспечения необходимой величины воздушного зазора между сердечниками статора и ротора.

Обмотка короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Обмотка короткозамкнутого ротора асинхронных двигателей $h \leqslant 355$ мм создается путем заливки пазов собранного сердечника алюминием А5. Для получения специальных характеристик, например у двигателей с повышенным скольжением, пазы ротора могут заливаться алюминиевым сплавом АКМ12-4. При заливке пазов одновременно образуются короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками и с расположенными между лопатками штырями, на которых крепят балансировочные грузы (см. рис. 3.2). Количество лопаток $N_л$ принимают в следующих пределах:

h, мм	50÷100	112÷250	280÷355
$N_л$	6÷9	10÷14	17÷22

Толщина лопатки $b_л \approx 0{,}3h^{1/2}$, длина $l_л \approx 0{,}31h$, высота $h_л \approx 0{,}83h^{2/3}$ (все размеры в мм).

Роторы двигателей с $h \leqslant 250$ мм обычно заливают в машинах для литья под давлением, а при $h=280 \div 355$ мм — с помощью вибрационной установки. Сварную клетку короткозамкнутого ротора двигателей с $h \geqslant 400$ мм изготовляют из алюминиевых шин. Концы пазных стержней размещают в канавках, выфрезерованных в короткозамыкающих кольцах, а затем приваривают, причем стержни поочередно выступают с каждой стороны за короткозамыкающее кольцо, образуя вентиляционные лопатки. Стержни крепят в пазах чеканкой по всей длине сердечника через шлиц паза; при

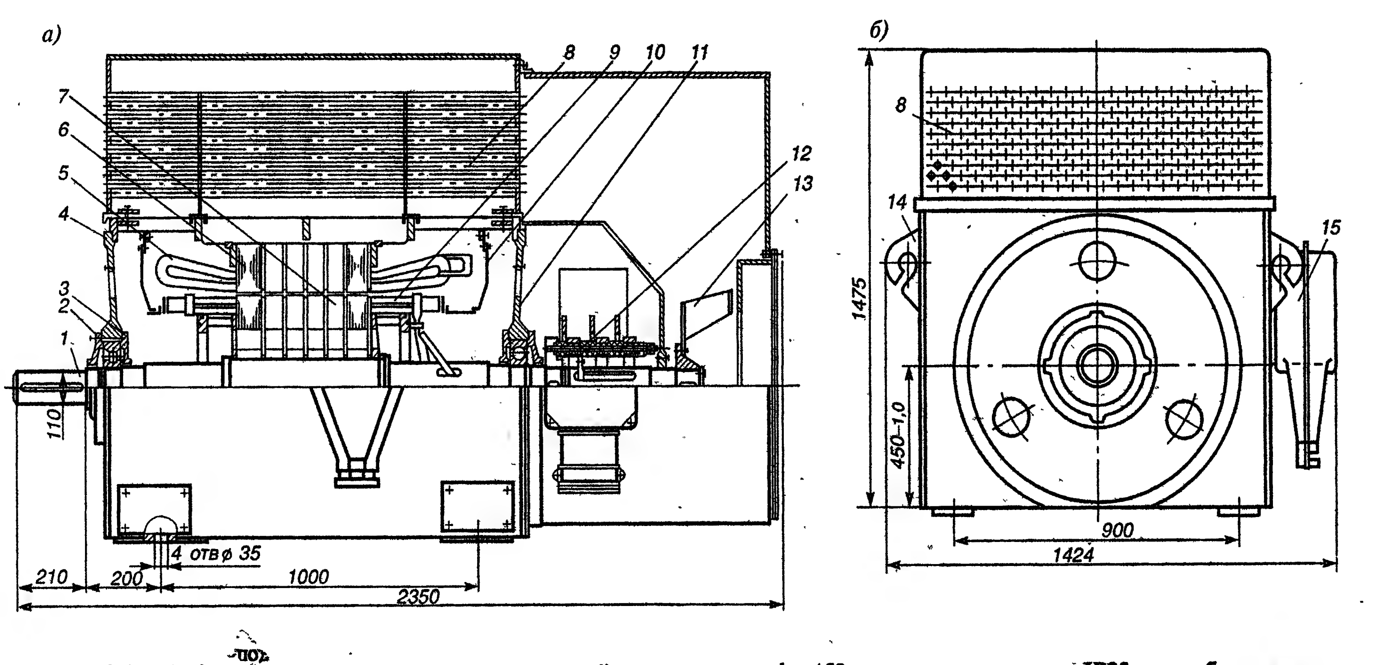


Рис. 3.4. Общий вид синхронного двигателя с высотой оси вращения $h=450$ мм; степень защиты IP23; способ охлаждения IC0161; 630 кВт; 6000 В, $2p=6$; ротор фазный:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *1* — вал; *2* — крышка подшипниковая наружная; *3* — крышка подшипниковая внутренняя; *4* — щит подшипниковый; *5* — обмотка статора; *6* — сердечник статора; *7* — сердечник ротора; *8* — воздухоохладитель; *9* — обмотка ротора; *10* — щиток, направляющий воздух; *11* — щит подшипниковый; *12* — узел контактных колец; *13* — вентилятор; *14* — ушко транспортное; *15* — коробка выводов

этом алюминий стержней затекает в предусмотренные для этого канавки.

Обмотка фазного ротора асинхронных двигателей. Фазный ротор двигателей с $h \leqslant 225$ мм выполняют с овальными полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой из круглых проводов. Обмотка катушечная однослойная двухплоскостная; конструкция изоляции обмотки такая же, как у якорей машин постоянного тока (см. Приложение 18).

Роторы двигателей с $h > 225$ мм (см. рис. 3.4) выполняют с прямоугольными полузакрытыми пазами и обмоткой изолированных медных стержней прямоугольного поперечного сечения, которые вставляют в пазы с торца. Обмотка волновая двухслойная; для получения секции волновой обмотки одному концу стержня придают изгиб заранее по шаблону, а второй конец изгибают после вставки стержня в паз. Каждый стержень предварительно изолируют, после чего спрессовывают. Соединяют стержни в лобовых частях хомутами, в которые дополнительно впаивают вентиляционные лопатки. Конструкция изоляции стержневой обмотки приведена в Приложении 17.

Марки пропиточных лаков и способы пропитки обмоток фазных роторов такие же, как для обмоток статоров (см. § 3.6). Лобовые части обмоток фазных роторов опираются на обмоткодержатели и крепятся бандажами из стеклянной нетканой ленты. Механический расчет бандажей выполняют по методике, приведенной в § 3.3.

3.3. Расчет бандажей и пазных клиньев

Бандажи и пазные клинья должны быть подвергнуты механическому расчету.

Расчет стеклобандажей. Общее число витков бандажей

$$\omega_{б\Sigma} = 9G_{м2}(D_{н2} - h_{п2})(n_р/1000)^2 \cdot 10^4/(\sigma_{доп}S_л), \tag{3.2}$$

где $G_{м2} = 9{,}81 \cdot m_{м2}$ — сила тяжести обмотки ротора, Н; $n_р$ — разгонная частота вращения, равная 1,2 наибольшей частоты вращения машины; $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стеклоленты равным $150 \cdot 10^6$ Па при классе нагревостойкости изоляции B и $130 \cdot 10^6$ Па — при классах F и H; $S_л$ — площадь поперечного сечения ленты, мм^2; $D_{н2}$ — наружный диаметр ротора; $h_{п2}$ — высота паза ротора.

При вычислении $\omega_{б\Sigma}$ для активной части ротора в (3.2) подставляют силу тяжести активной части обмотки ротора $G_{м2}' = G_{м2}2l_2/l_{ср2}$, а для каждой из лобовых частей — силу тяжести одной из них — $G_{м2}' = 0{,}5G_{м2}(1 - 2l_2/l_{ср2})$, l_2 — длина сердечника ротора; $l_{ср2}$ — средняя длина витка обмотки ротора.

Расчет бандажей из стальной немагнитной проволоки. Расчет проводится также по (3.2) с заменой $S_{л}$ на площадь поперечного сечения $S_{пр}$ общего числа витков проволоки (мм^2) и подстановкой допустимого напряжения растяжения $\sigma_{доп}=450\cdot10^6$ Па (для стальной проволоки).

Расчет пазных клиньев. Напряжение изгиба в клине (Па)

$$\sigma=84b_к(G_{м2}/l_{ср2})(D_{н2}-h_{п2})(n_р/1000)^2/h^2_к, \tag{3.3}$$

где $b_к$ и $h_к$ — высота и ширина клина соответственно.

Значение σ не должно превышать для стеклотекстолита $25\cdot10^6$ Па. Напряжение на срез в клине (Па)

$$\tau=32(G_{м2}/l_{ср2})(D_{н2}-h_{п2})(n_р/1000)^2 10^4/h_к. \tag{3.4}$$

Значение τ не должно превышать $15\cdot10^6$ Па.

3.4. Станина

Станины машин переменного тока в основном изготовляют чугунными литыми; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозионной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. В малых асинхронных двигателях с высотой оси вращения $h\leqslant71$ мм наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением. Такая конструкция весьма технологична, сокращает трудоемкость изготовления статора, однако при $h>71$ мм значительно сказываются деформация внутреннего отверстия сердечника статора при обливке его алюминиевыми сплавами и снижение механической прочности.

В машинах с $h\geqslant280$ мм кроме чугунных используют также сварные станины из стального проката. Один из видов таких станин — коробчатая станина асинхронных двигателей с $h=280\div355$ мм — представляет собой сварную трубу со стойками, образующими опорные лапы и полукруговые ребра для посадки сердечника и подшипниковых щитов. В машинах с $h<280$ мм сварные станины применяют реже из-за многообразия отдельных элементов деталей, предназначенных для сварки (ребер, ушек, бобышек и др.), затрудняющего использование автоматизированных и механизированных производственных процессов на участке сварки.

Станины машин со степенью защиты IP23 (см. рис. 3.3) выполняются с внутренними продольными ребрами, обрабатываемыми под посадку сердечника статора. Станины при радиальной системе вентиляции имеют в боковых частях вентиляционные отверстия, предназначенные для выхода охлаждающего воздуха. Для обеспечения степени защиты IP23 отверстия закрывают жалюзи, которые могут

изготовляться методом штамповки из листовой стали или литыми из алюминиевых сплавов. При аксиальной системе вентиляции отверстия в станине отсутствуют.

Станины машин со степенью защиты IP44 (см. рис. 3.2) обычно имеют продольные ребра на наружной поверхности. Высота ребра $h_р \approx 0{,}6h^{3/4}$, число ребер $n_р \approx 6{,}4h^{1/3}$. В машинах с $h > 355$ мм для увеличения поверхности охлаждения в стальной станине применяют вваренные по всей окружности трубки распределенного воздухоохладителя.

Станины машины со способом монтажа IM1001 имеют опорные лапы, отливаемые заодно с чугунной станиной или приваренные к стальной станине. В станинах асинхронных двигателей, образуемых из алюминиевых сплавов, лапы отливают отдельно, а затем крепят к статору.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Удобным в эксплуатации является расположение коробки выводов сверху станины, так как при повороте коробки подводимый кабель может присоединяться с разных сторон машины.

Для обеспечения требований по технике безопасности на станине размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. Зажимы снабжают устройством от самоотвинчивания и крепят около опорных лап и в коробке выводов. При выполнении машин без лап один зажим располагают на фланцевом щите.

Для обеспечения посадки и центрирования подшипниковых щитов на торцах станины предусматривают кольцевые цилиндрические заточки (внутренние или наружные), а для крепления щитов — приливы или ушки с нарезанными отверстиями для болтов.

Станины протачивают по внутреннему диаметру под посадку отдельно изготовленных сердечников. Если сердечники набирают из отдельных листов прямо в станину, то при проточке в станине выбирают круговые канавки для крепления спрессованного сердечника кольцевыми или поперечными шпонками.

На станине в верхней части предусмотрены рым-болты (Приложение 26) или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. Машины массой менее 30 кг не имеют специальных устройств для подъема. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозийных материалов с техническими данными машины.

3.5. Подшипниковые щиты и подшипники

Подшипниковые щиты изготовляют либо чугунными литыми, либо сварными из стального проката. Для малых машин применяют щиты, изготовляемые литьем под давлением из алюминиевых

сплавов. Для обеспечения минимальной деформации при закреплении щитов в приспособлениях металлообрабатывающих станков, а также уменьшения перекоса подшипников при сборке машин аксиальные размеры проектируемых щитов целесообразно сокращать, стремясь приблизить их форму к диску.

В защищенных машинах с исполнением по защите IP23 подшипниковые щиты при радиальной системе вентиляции одинаковые с обеих сторон машины; при аксиальной системе вентиляции щиты обычно не унифицируют из-за наличия с одной стороны машины внутреннего вентилятора. При радиальной вентиляции в торцовой части подшипниковых щитов располагают отверстия для входа охлаждающего воздуха; при аксиальной — отверстия для входа и выхода воздуха устраивают в нижней части щитов. Вентиляционные отверстия закрывают жалюзи.

При радиальной вентиляции для повышения ее эффективности на внутренней части подшипниковых щитов крепят направляющие воздух щитки, выполняемые из листовой стали в виде воронок. Щитки располагают на расстоянии $5 \div 7$ мм от торцов лопаток ротора в аксиальном направлении.

Подшипниковые щиты закрытых машин с исполнением по защите IP44 и со способами охлаждения IC0141 и IC0041 — глухие. При выполнении таких щитов из алюминиевых сплавов у них предусматривают оребренные торцы, увеличивающие поверхность охлаждения машины. Щиты имеют цилиндрическую круговую заточку (замок) для посадки на заточку станины при сборке машины. Для крепления к станине в щитах имеются ушки с отверстиями для болтов.

В центральной части щитов предусматривается втулка со сквозной проточкой для посадки подшипников качения, которые практически полностью вытеснили в машинах мощностью до 1000 кВт подшипники скольжения. Основными преимуществами подшипников качения являются: упрощение обслуживания в эксплуатации, компактность и уменьшенные размеры подшипникового узла, малые потери на трение, незначительный износ, обеспечивающий постоянство воздушного зазора.

Наружные кольца подшипников крепят по торцам подшипниковыми крышками, фиксирующими расположение подшипников в аксиальном направлении. Внутреннее кольцо подшипника насаживается на вал с плотной посадкой, а наружное входит во втулку подшипникового щита подвижно, так что при разборке машины подшипники остаются на валу. Этим облегчается как сборка, так и разборка машины.

В малых машинах с $h \leqslant 160-200$ мм оба подшипника шариковые радиальные однорядные по ГОСТ 8338 — 75; при этом с одной стороны машины между подшипниковой крышкой и подшипником оставляют зазор, который обепечивает возможность аксиального

перемещения вала, компенсирующего неточности осевых размеров при сборке машины. Для компенсации указанных отклонений могут также применяться с обеих сторон машины пружинящие стальные гофрированные шайбы.

В больших машинах со стороны выступающего конца вала располагают роликовый подшипник радиальный с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328 — 75; при этом отпадает надобность в зазоре или в пружинящих шайбах, так как роликовый подшипник обеспечивает возможность аксиального перемещения вала.

Радиальные подшипники могут воспринимать как радиальную, так и осевую нагрузку, не превышающую 70% неиспользованной радиальной нагрузки.

Для подшипников качения используют консистентную мазеобразную смазку, которой заполняют около 2/3 смазочной камеры; заполнение смазкой всего объема камеры ведет к повышению нагрева подшипников. Для консистентной смазки достаточны несложные уплотнения в виде прямоугольных кольцевых канавок, протачиваемых в подшипниковых крышках; канавки при сборке машины также заполняют консистентной смазкой.

В подшипниковых щитах может быть предусмотрено устройство для пополнения и частичной замены консистентной смазки. При этом свежая смазка подается специальным приспособлением под давлением в пространство за внутренней подшипниковой крышкой, вытесняя отработанную смазку через наружную крышку подшипникового узла.

Смена и пополнение смазки не требуются, когда в машинах применяют шариковые радиальные однорядные подшипники закрытого типа с двусторонним уплотнением, не выходящим за габариты подшипников, и с заложенной на весь срок службы консистентной смазкой по ГОСТ 8882 — 75. При установке таких подшипников отверстие под их посадку во втулке подшипникового щита делают не сквозным, а глухим, т. е. совмещают подшипниковую крышку со щитом.

У машин, крепление которых осуществляется фланцем (с лапами и без лап), подшипниковый щит отливается совместно с фланцем. Размеры фланцев должны соответствовать ГОСТ 18709 — 75 и 20839 — 75.

3.6. Сердечник и обмотка статора

Сердечник статора. Сердечник статора машин с $h \leqslant 250$ мм набирают на центрирующую оправку вне станины из отштампованных листов стали, спрессовывают, потом без снятия давления проверяют длины в канавках, расположенных на наружной поверхности сердечника. Для сердечника статора применяют крепление сталь-

ными скобами, расположенными в канавках по наружной поверхности сердечника. При таких способах сборки выдерживаются необходимые внутренний диаметр и форма сердечника без растачивания, снижаются потери в стали, уменьшается трудоемкость укладывания обмотки, выполнения соединений и пропитки.

При коробчатой станине сердечники статоров двигателей также изготовляют вне станины с обмоткой и укладывают при сборке двигателей в соответствующие заточки на внутренних ребрах полустанины. К собранному сердечнику приваривают по бокам стальные пластины, которыми сердечник опирается на края станины и крепится к ней болтами.

У машин с $h>250$ мм сердечник собирают набором листов непосредственно в станину; после опрессовки сердечник закрепляют в станине кольцевыми или поперечными шпонками. При таком способе сборки сердечника возникает необходимость расточки его по внутреннему диаметру.

Сердечники статоров двигателей с $h\leqslant 250$ мм протачивают по наружному диаметру для улучшения теплового контакта со станиной. Обмотанный и пропитанный сердечник впрессовывают в станину, если станина не образуется путем обливки сердечника алюминиевыми сплавами.

У сердечников длиной более $300\div 350$ мм радиальные вентиляционные каналы образуют с помощью двутавровых распорок, расположенных радиально на каждом зубце, с обеспечением их надежного закрепления приваркой к листам статора.

Обмотка статора. Однослойная обмотка статора распространена только у асинхронных двигателей относительно небольшой мощности с $h\leqslant 160$ мм, двухслойная обмотка статора — в больших асинхронных двигателях. Для низковольтных машин ($U\leqslant 660$ В) с $h\leqslant 280$ мм обычно применяют трапецеидальные полузакрытые пазы со всыпной обмоткой, в низковольтных машинах с большими значениями h — прямоугольные полуоткрытые, в высоковольтных — прямоугольные открытые пазы с жесткими формованными катушками.

У асинхронных двигателей с $h=50\div 160$ мм, выпускаемых в больших количествах, для всыпной обмотки статора используют автоматические станки, работа которых более эффективна при выполнении двигателей с однослойной концентрической обмоткой. При этом катушечные группы наматывают обычно раздельно, а затем статорообмоточный станок выполняет операцию втягивания катушек в пазы статора, заклинивает обмотку в пазах и формует лобовые части обмотки. Концентрические катушки изготовляют из круглых проводов соответствующего класса нагревостойкости изоляции, причем ширина шлица полузакрытого паза должна обеспечивать достаточную технологичность укладки обмотки.

Пазовые коробочки, нарезанные из однослойного рулонного материала, также формуют и укладывают в пазы станками-автоматами. Вылет коробочек с каждой стороны сердечника составляет 4—7 мм, причем для повышения механической прочности торцов пазовых коробочек их края загибают на 180°.

Клинья выполняют из листового изоляционного материала, придавая им изгиб по форме верхней части паза. Из этого же материала изготовляют прокладки, укладываемые в лобовые части обмотки между головками катушек. Пайки соединений катушечных групп, образующих фазы обмотки, заключают в изоляционные трубки. Лобовые части обмотки с обеих сторон двигателя бандажируют на специальных станках стеклошнуром. Обмотанные статоры пропитывают.

Двухслойную всыпную обмотку статора из круглых проводов у машин с $h \geqslant 180$ мм изготовляют вручную или с механизированной укладкой катушек. Принципиальная конструкция изоляции обмотки этих машин такая же, как у асинхронных двигателей с $h = 50 — 160$ мм, за исключением того, что между верхними и нижними слоями обмотки размещают коробчатые изоляционные прокладки. Вылеты коробочек с каждой стороны сердечника составляют $7 \div 10$ мм. Конструкция изоляции одно- и двухслойной всыпной обмотки статора приведена в Приложении 18.

Двухслойную обмотку статора машин с $h > 250 — 280$ мм изготовляют из формованных полукатушек, укладываемых в прямоугольные полуоткрытые пазы. Провод обмотки — прямоугольный. Предварительно намотанной на шаблоне заготовке-«лодочке», состоящей из двух полукатушек, скрепленной обволакивающим компаундом, придают необходимую форму на растягивающем устройстве; затем полукатушки опрессовывают в пазовых частях и дополнительно скрепляют лакированной фенилоновой бумагой. Лобовые части полукатушек скрепляют в двух-трех местах бандажами из стеклоленты, а у крайних полукатушек фаз обмотки лобовые части дополнительно изолируют стеклолентой. Полукатушки укладывают поочередно через шлиц в полуоткрытые пазы.

Для обеспечения механической прочности обмотки при воздействии на нее значительных усилий, возникающих при прямом включении двигателя в сеть, лобовые части обмотки крепят стеклошнуром к бандажным кольцам. Между лобовыми частями катушек располагают распорки из стеклотекстолита с последующим перевязыванием стеклошнуром в шахматном порядке. Торцы пазовых коробочек выступают из сердечника статора на $15 \div 20$ мм. Конструкция изоляции машин с полуоткрытыми пазами статора приведена в Приложении 19.

У тихоходных двигателей с $h = 280$ и 315 мм при $2p = 10$ и 12 обычно применяют для повышения энергетических показателей тра-

пецеидальные полузакрытые пазы с двухслойной всыпной обмоткой, хотя при этом надежность обмотки несколько снижается в сравнении с обмоткой из жестких формованных катушек в полуоткрытых пазах. Конструкция изоляции обмотки статора таких двигателей приведена в Приложении 20.

Для пропитки обмоток статора рекомендуются следующие лаки и способы пропитки:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F, H
Марка лака и способ пропитки	КП-34, КП-103, БСП (без растворителей, струйный метод)	КО-964Н (с растворителем, под вакуумом и давлением)

При использовании этих пропиточных лаков отпадает необходимость в применении покровных эмалей на лобовых частях обмоток.

Обмотку статора двигателей с $h \geqslant 400$ мм на напряжение 6000 В выполняют двухслойной из жестких формованных катушек. Провод обмотки прямоугольный; намотанные из этого провода «лодочки» растягивают и спрессовывают, затем катушки изолируют и укладывают в прямоугольные открытые пазы. Крепление лобовых частей такое же, как у низковольтных двигателей с жесткими катушками. Для повышения надежности и улучшения теплопроводности изоляции обмотки статора в высоковольтных машинах целесообразно применение изоляции «Монолит». Конструкция изоляции обмотки статора двигателей на напряжение 6000 В приведена в Приложении 21.

3.7. Выводное устройство

Выводное устройство машины состоит из закрытой коробки выводов с расположенными в ней доской зажимов или изоляторами. У асинхронных двигателей коробка выводов снабжается соответствующим приспособлением для крепления подводимых проводов — 1 — 2 штуцерами или муфтой.

У асинхронных двигателей с $h = 80 \div 250$ мм коробку выводов обычно располагают сверху станины, в машинах с большими значениями h — сбоку станины. Коробка выводов, размещаемая наверху асинхронных двигателей с $h = 56 \div 132$ мм, допускает поворот с фиксацией положения через 90°, а у двигателей с $h = 160 \div 250$ мм — через 180°. Степень защиты коробки выводов должна соответствовать степени защиты машины.

Общие виды асинхронных двигателей с продольными и поперечными разрезами приведены на рис. 3.2, 3.3, 3.4.

Глава 4

ПОТЕРИ И КПД

4.1. Подразделение потерь

Преобразование электрической энергии в механическую в электродвигателях и механической в электрическую в генераторах сопровождается рассеянием части подведенной энергии, т. е. потерями.

В электрических машинах различают основные и добавочные потери. *Основные потери* возникают в результате электромагнитных и механических процессов, которые определяют работу машины. К основным потерям относятся электрические потери в обмотках, электрические потери в переходных контактах щеток на коллекторе и кольцах, магнитные потери от основного потока в стальных сердечниках, механические потери. *Добавочные потери* возникают в результате вторичных процессов электромагнитного характера, например вследствие пульсации магнитного потока в воздушном зазоре, из-за наличия высших гармонических в кривых МДС статора и ротора, из-за потоков рассеяния обмоток и т. п.

Потери в обмотках. Электрические потери в обмотках вычисляют по току и сопротивлению обмотки постоянному току. Учитывая, что температура обмоток отдельных (даже однотипных) электрических машин при их работе в номинальном режиме не совпадает между собой (их температура, как правило, ниже допустимых предельных значений для примененного класса изоляции), при определении потерь, а также при уточнении магнитного потока и при расчете рабочих характеристик сопротивление обмоток приводят к стандартной рабочей температуре, установленной ГОСТ 183 — 74; 75 °С — для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В и 115 °С — классов F и Н. Соответственно сопротивление обмоток, рассчитанное для температуры 20 °С, умножают на коэффициент $m_т$:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F, H
Значение коэффициента $m_т$	$1+0{,}004(75-20)=1{,}22$	$1+0{,}004(115-20)=1{,}38$

Потери в стальных сердечниках. Основные магнитные потери в стальных сердечниках электрических машин, вызываемые основным магнитным потоком машины, возникают в частях сердечников, подверженных перемагничиванию — в статоре (в зубцах и спинке) машин переменного тока. Потерями в стали сердечников ротора асинхронного двигателя пренебрегают вследствие малой частоты перемагничивания при номинальном режиме работы и соответственно незначительных потерь.

Потери в стали состоят из потерь от гистерезиса, пропорциональных частоте перемагничивания в первой степени, и потерь от вихревых токов, пропорциональных частоте перемагничивания во второй степени. Зависимость суммарных потерь от частоты перемагничивания выражается степенной функцией, показатель которой зависит от свойств стали (ее марки). Потери в стали, кроме того, пропорциональны удельным магнитным потерям $p_{1,0/50}$, установленным ГОСТ 21427.2 — 83, массе рассматриваемой части магнитопровода m и квадрату магнитной индукции B^2. Таким образом, потери в рассматриваемой части стальных сердечников

$$P_c = Kp_{1,0/50}(f/50)^{\beta}B^2m. \tag{4.1}$$

Здесь K — поправочный коэффициент, учитывающий увеличение потерь в зубцах и в спинке сердечника из-за резки, штамповки и сборки листов, опрессовки, опиловки и обточки сердечников, а также из-за неравномерного распределения магнитной индукции. Значение коэффициента K зависит от качества штампов и совершенства технологического процесса изготовления сердечников (среднее значение K, установленное опытным путем, составляет для машин переменного тока 1,7).

Значения удельных магнитных потерь $p_{1,0/50}$, регламентированных ГОСТом, в состоянии поставки и показателя степени β для разных марок холоднокатаной электротехнической стали при толщине листов 0,5 мм приведены ниже:

Марка стали	2013	2312	2411
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	2,5	1,75	1,6
β	1,5	1,4	1,3

Примечание. Удельные потери для других марок изотропной холоднокатаной стали приведены в ГОСТ 21427.2 — 83.

Механические потери. Эти потери состоят из потерь на трение в подшипниках, трения щеток на контактных кольцах, трения ротора о воздух и потерь на вентиляцию машины.

Потери на трение щеток зависят от коэффициента трения щеток о контактные кольца $k_{тр}$, удельного давления пружины на щетку $p_{щ}$, площади поверхности щеток в контакте $S_{щ\Sigma}$ и окружной линейной скорости контактных колец $v_к$.

Потери на трение в подшипниках, трение ротора о воздух и потери на вентиляцию машины точно рассчитать затруднительно; для их приближенного определения обычно пользуются эмпирическими зависимостями, составленными на основе многочисленных испытаний изготовленных машин. Такие зависимости для асинхронных машин приведены в § 6.8.

Добавочные потери. Классификация видов добавочных потерь велика. Более значительными из этих потерь у асинхронных двигателей являются потери на поверхности ротора от зубцовых гармонических МДС статора и при х.х., вызванные зубчатым строением статора; потери в обмотке статора от вихревых токов, наводимых собственным потоком рассеяния. Согласно ГОСТ 1828 — 75 при определении КПД добавочные потери при нагрузке у асинхронных двигателей учитывают приближенно в процентах от подводимой мощности (P_1), как указано ниже:

$$p_{доб} = 0{,}005 P_1. \tag{4.2}$$

Указанные значения добавочных потерь относятся к номинальной мощности машины; при мощности, отличающейся от номинальной, это значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату тока рабочей цепи машины.

4.2. Определение КПД и нагрузки, соответствующей максимальному КПД

Коэффициент полезного действия машины (о.е.)

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - P_\Sigma)/P_1 = 1 - P_\Sigma/P_1, \tag{4.3}$$

где P_1 — подводимая мощность; P_Σ — сумма потерь в машине (мощность и потери малых машин могут выражаться в Вт, а больших — в кВт).

При изменении нагрузки машины меняется ее КПД. Определим условия, соответствующие максимальному КПД любой машины. Потери в электрической машине можно подразделить на постоянные и переменные. К *постоянным потерям* $P_{пост}$, практически не зависящим от нагрузки, относятся потери в стальных сердечниках и механические потери. *Переменными потерями* $P_{пер1}$, зависящими от тока нагрузки в первой степени, являются потери в контактах щеток. К *переменным потерям* $P_{пер2}$, зависящим от тока нагрузки во второй степени, относятся потери в обмотках, а также добавочные потери.

На примере работы машины в режиме генератора связь КПД с составляющими потерь выражается следующим образом:

$$\eta = 1 - P_\Sigma/P_1 = 1 - (P_{пост} + P_{пер1} + P_{пер2})/(P_2 + P_{пост} + P_{пер1} + P_{пер2}) =$$

$$= 1 - (P_{пост} + AI + BI^2)/(UI + P_{пост} + AI + BI^2), \tag{4.4}$$

где A и B — коэффициенты пропорциональности.

Взяв производную от (4.4) по току, определим условие, при котором КПД имеет максимальное значение:

$$P_{пост} = BI^2 = P_{пер2}. \tag{4.5}$$

Следовательно, максимальному значению КПД соответствует такая нагрузка, при которой переменные потери, пропорциональные I^2, будут равны постоянным потерям машины. Это условие относится также и к работе машины в режиме двигателя.

Учитывая, что асинхронные двигатели в зависимости от мощности и вида привода работают в среднем при 0,5 — 0,6 номинальной мощности, их целесообразно проектировать так, чтобы КПД достигал максимального или близкого к нему значения при указанных нагрузках.

Глава 5
ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

5.1. Общие положения

После выполнения электромагнитных расчетов машины необходимо провести тепловой расчет для определения ожидаемого установившегося превышения температуры обмоток при продолжительном режиме работы (S1).

Распределение температуры в обмотках электрических машин неравномерно, а измерение методом сопротивления или термометра не дает возможность определить температуру в наиболее горячей точке обмотки. Поэтому пределы температуры в обмотках, допускаемые по ГОСТ 183 — 74, на изоляционные материалы*:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F	H
Предельно допускаемые температуры, °С:			
изоляционных материалов (СТ 782 — 77)	130	155	180
обмоток машин (ГОСТ 183 — 74)	120	140	165
Предельно допускаемые превышения температуры обмоток машин, °С	80	100	125

Тепловой расчет обмоток производят, исходя из наиболее неблагоприятных условий, для чего потери в обмотках рассчитывают, исходя из сопротивлений обмоток, приведенных к максимально

*Допускаемые превышения температуры обмоток указаны при температуре охлаждающей среды 40 °С и при измерении методом сопротивления.

Для контактных колец предельно допускаемые превышения температуры при измерении методом термометра составляют для класса нагревостойкости изоляции B — 80 °С, для класса F — 90 °С и для класса H — 100 °С.

допускаемой температуре при выбранном классе нагревостойкости изоляции. Для этого сопротивления обмоток, рассчитанные для температуры 20 °С, умножают на коэффициент $m'_т$:

Класс нагревостойкости изоляции	B	F	H
Значение коэффициента $m'_т$	$1+0{,}004(120-20)=$ $=1{,}4$	$1+0{,}004(140-20)=$ $=1{,}48$	$1+0{,}004(165-20)=$ $=1{,}58$

5.2. Теплоотдача и теплопередача

Возникающие в машине потери выделяются в виде теплоты и передаются охлаждающей среде (воздух, масло, вода, водород, гелий и т. п.) через поверхность отдельных частей непосредственно или через другие граничащие с ними части машин. В асинхронных двигателях общего назначения охлаждающей средой является воздух.

Передаваемый через поверхность тепловой поток (Вт)

$$P_п=\alpha_п\Delta t_п S_п, \tag{5.1}$$

где $\alpha_п$ — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(мм$^2\cdot$град); $\Delta t_п$ — превышение температуры поверхности над температурой охлаждающего воздуха, °С; $S_п$ — площадь поверхности охлаждения, мм^2.

Для аналогии с электрической цепью представим (5.1) в виде

$$\Delta t_п=P_п R_п, \tag{5.2}$$

где $R_п=1/(\alpha_п S_п)$.

Здесь падению напряжения соответствует превышение (перепад) температуры $\Delta t_п$, току — потери (тепловой поток) $P_п$, сопротивлению электрической цепи — тепловое сопротивление $R_п$.

По пути к охлаждаемой поверхности тепловой поток встречает дополнительное тепловое сопротивление в изоляции и в металлах. При тепловом расчете учитывают только тепловое сопротивление изоляционных материалов, обладающих малым коэффициентом теплопроводности; тепловым сопротивлением металлов (медь, сталь, чугун) пренебрегают ввиду их высокой теплопроводности. Тепловой поток (Вт), протекающий через изоляцию:

$$P_и=\lambda_и\Delta t_и S_и/\delta_и, \tag{5.3}$$

где $\lambda_и$ — коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(мм$\cdot$град); $\Delta t_и$ — перепад температуры в изоляции,°С; $S_и$ —

площадь односторонней поверхности изоляции, мм^2; $\delta_и$ — толщина изоляции, мм.

Уравнение (5.3) представим в следующем виде:

$$\Delta t_и = P_и R_и, \qquad (5.4)$$

где $R_и = \delta_и / (\lambda_и S_и)$.

Потери в машине, передаваемые охлаждаемому воздуху внутри машины, подогревают проточный воздух в защищенной машине или воздух в замкнутом объеме в закрытой машине.

Тепловой поток (Вт), передаваемый воздуху внутри машины,

$$P_\Sigma = \alpha_в \Delta t_в S_в, \qquad (5.5)$$

где $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(мм^2·град); $\Delta t_в$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины, °С; $S_в$ — условная поверхность охлаждения машины, мм^2. Уравнение (5.5) представим в следующем виде:

$$\Delta t_в = P_\Sigma R_в. \qquad (5.6)$$

У закрытых машин все потери (кроме потерь в наружном вентиляторе) передаются изнутри машины наружному охлаждающему воздуху. При этом тепловое сопротивление $R_в$ должно включать в себя тепловое сопротивление поверхности машины наружному охлаждающему воздуху.

5.3. Упрощенные методы тепловых расчетов

Методы расчета, основанные на экспериментальном моделировании или на тепловых схемах замещения, как правило, не дают желаемую высокую точность, требуют значительных экспериментальных и расчетных усилий. Это вызвано рядом причин. Процессы теплообмена в электрических машинах сопровождаются сложным характером течения охлаждающего воздуха, связанным с его турбулентностью и вихреобразованием. Получение точных решений соответствующих уравнений движения охлаждающего воздуха затруднительно, но даже при наличии таковых расчет сложен и трудоемок. Кроме того, результаты расчета могут не совпадать с действительными температурами отдельных частей электрических машин вследствие влияния неоднородности слоистых изоляционных материалов, трудно учитываемых неизбежных воздушных включений, а также неизбежных, но допустимых технологических отклонений (например, в величине воздушного зазора между сердечником статора и корпусом машины). Поэтому во многих случаях проектирования вполне обосновано применение упрощенных

методов теплового расчета, основанных на использовании коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, полученных по результатам экспериментального исследования значительного количества подобных машин.

При составлении упрощенной методики теплового расчета принимают следующие допущения: 1) потери в обмотках и потери в стали сердечников статора, фазного ротора создают одинаковый греющий эффект; 2) потери в активной части сердечников отводятся их цилиндрической поверхностью, а потери в лобовых частях обмоток статора и фазного ротора отводятся цилиндрической поверхностью лобовых частей обмоток. В настоящей книге для теплового расчета асинхронных двигателей рекомендованы и применены упрощенные методы теплового расчета.

5.4. Предварительная оценка ожидаемого нагрева обмоток статора и якоря

Ожидаемое превышение температуры обмоток статора в значительной мере определяется уровнем удельной тепловой нагрузки статора или якоря от электрических потерь в обмотке. У машин переменного тока линейная нагрузка статора (А/см)

$$A_1 = 20 m_1 w_1 I_1 / (\pi D_1). \quad (5.7)$$

Подставив в (5.7) с соответствующими преобразованиями значения I_1 из (6.41), w_1 из (6.180), учитывая, что потери в обмотке статора $P_{м1} = m_1 I^2{}_1 m_т r_1$ (здесь r_1 — сопротивление фазы обмотки статора при 20 °С), получим

$$A_1 J_1 = 114 \cdot 10^4 P_{м1} (m_т \pi D_1 l_{ср1}). \quad (5.8)$$

Принимая поверхность охлаждения обмотки статора пропорциональной произведению $\pi D_1 l_{ср1}$, легко заметить, что $A_1 J_1$ будет характеризовать удельную тепловую нагрузку статора от электрических потерь в его обмотке.

Уровень значений $A_1 J_1$ в спроектированных машинах, определяемый при расчете обмоток статора, дает возможность предварительно оценить ожидаемое превышение температуры обмотки до проведения теплового расчета. Допускаемые значения $A_1 J_1$ зависят от условий охлаждения машин и класса нагревостойкости изоляции. Средние допускаемые значения $A_1 J_1$ приведены на рис. 6.9.

5.5. Системы вентиляции

Потери, возникающие в электрических машинах при их работе, переходят в теплоту, которую необходимо отводить для того, чтобы температура активных частей не превысила допустимых пределов, указанных в ГОСТ 183 —74. Как правило, для усиления отвода теплоты в машинах применяют искусственную вентиляцию, осуществляемую соответствующими устройствами.

Искусственную вентиляцию подразделяют на самовентиляцию, при которой охлаждение осуществляется вентилятором, размещенным на валу машины (или другими вентилирующими устройствами вращающейся части машины), и на независимую вентиляцию с подачей охлаждающего воздуха в машину вентилятором с приводом от отдельного двигателя.

Система самовентиляции может быть *радиальной* и *аксиальной*. У машин со степенями защиты IP23 или IP22 и способом охлаждения IC01 при радиальной вентиляции охлаждающий воздух засасывается через торцовые окна обоих подшипниковых щитов, отбрасывается в радиальном направлении, омывая активные части машины, и выбрасывается через боковые окна станины (рис. 5.1, *а*). Засасывание воздуха в машину и его выбрасывание осуществляются с помощью лопаток ротора, а также его радиальных вентиляционных каналов (у сердечников длиной более 300 мм). Такая радиальная вентиляция называется *двусторонней, симметричной*, она обладает преимуществами в части простоты и технологичности конструкции, более низкого уровня шума и вентиляционных потерь, а охлаждающий эффект этой системы при частоте вращения 750 об/мин и ниже — не уступает действию аксиаль-

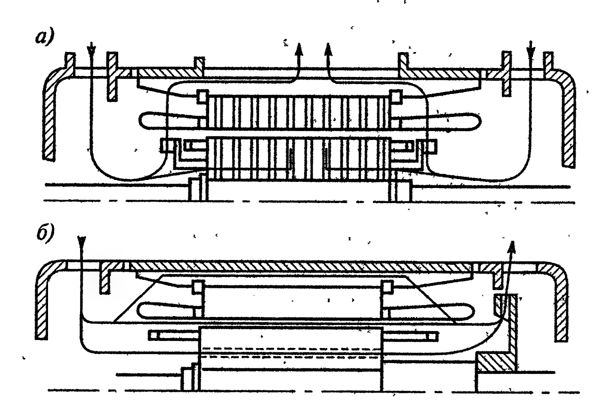


Рис. 5.1. Схемы двусторонней симметричной радиальной (*а*) и вытяжной аксиальной (*б*) вентиляции машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01

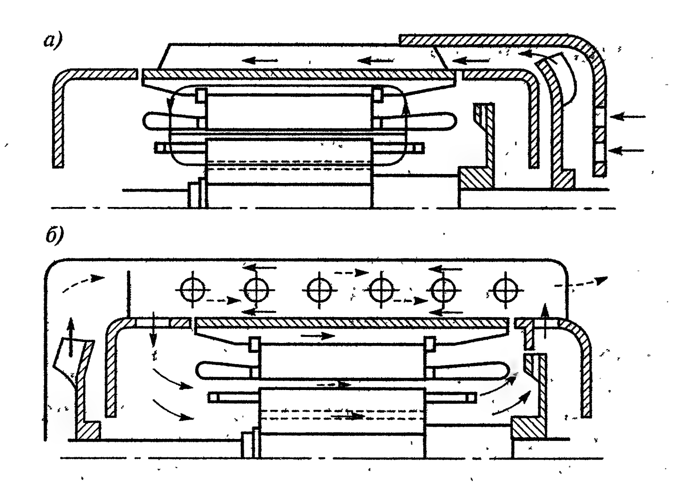


Рис. 5.2. Схемы вентиляции машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (*а*) и IC0161 (*б*)

ной вентиляции. Двусторонняя симметричная радиальная вентиляция широко распространена в асинхронных двигателях (с $h > 315$ мм).

При аксиальной вентиляции охлаждающий воздух засасывается через окна одного подшипникового щита, движется параллельно оси вала машины и выбрасывается через окна другого щита, расположенного со стороны выступающего конца вала (рис. 5.1, *б*); под этим же щитом на валу расположен вентилятор, засасывающий и выбрасывающий воздух. Такая аксиальная вентиляция называется вытяжной; она хотя и сложнее радиальной, но обеспечивает высокий теплосъем при частотах вращения более 750 об/мин. Применение вытяжной аксиальной вентиляции предпочтительно для синхронных машин $h \leqslant 315$ мм и для машин постоянного тока.

У машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (рис. 5.2, *а*) внешняя поверхность станины обдувается вентилятором, расположенным на конце вала машины, противоположном выступающему концу. Вентилятор закрыт кожухом, направляющим охлаждающий воздух вдоль ребер или гладкой поверхности станины. У машин переменного тока большой мощности для повышения эффекта охлаждения используют в роторе аксиальные каналы, через которые проходит наружный охлаждающий воздух («продуваемый» ротор). Вместо обдува наружной поверхности машины могут применяться воздухо-воздушные охладители: сосредоточенные пристроенные (рис. 5.2, *б* — способ охлаждения IC0161) и рассредоточенные в виде труб, вваренных по внешней окружности станины (способ охлаждения IC0151).

5.6. Требования к вентиляторам. Вентиляционный расчет

Для машин с аксиальной системой вентиляции применяют в основном центробежные вентиляторы с радиально расположенными лопатками, при которых производительность вентилятора не зависит от направления вращения машины.

При вращении центробежного вентилятора воздух, находящийся между лопатками, отбрасывается центробежной силой к периферии вентилятора, а затем выходит наружу. При этом у входных отверстий вентилятора создается разрежение, а на наружном диаметре вентилятора повышенное давление.

Для снижения вентиляционного шума и улучшения эффекта охлаждения у машин со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01 целесообразно наружный диаметр вентилятора выбирать меньше внутреннего диаметра станины на 10 — 20%, чтобы в месте выхода воздуха из вентилятора образовывалась камера расширения.

У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23 и с радиальной системой вентиляции роль вентиляторов выполняют лопатки, отливаемые заодно с короткозамыкающими кольцами ротора (см. рис. 3.3), у двигателей с фазным ротором лопатки впаяны в хомутики, соединяющие концы стержней обмотки ротора.

Вентиляционный расчет. Вентиляционный расчет производят с целью определения расхода воздуха $V_в$, необходимого для охлаждения машины, и напора вентилятора H, обеспечивающего этот расход. Точный расчет вентиляционных систем электрических машин представляет сложную задачу, а различные отклонения размеров отдельных деталей и узлов (даже в пределах установленных допусков) влекут за собой несовпадение результатов испытания с расчетными данными. Поэтому далее излагаются применяемые на практике приближенные методы расчета вентиляции, базирующиеся на заводском опыте.

Необходимый расход воздуха (м^3/с) у машин с аксиальной системой вентиляции, со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01

$$V_в = P'_\Sigma/(c_в \Delta t'_в), \tag{5.9}$$

где P'_Σ — потери, отводимые воздухом, проходящим через машину, Вт; $c_в = 1100$ — теплоемкость воздуха, Дж/(°С·м^3); $\Delta t'_в$ — превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим ($\Delta t'_в = 2\Delta t_в$), °С; $\Delta t_в$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха, °С.

Характеристика воздухопровода машины, выражающая связь напора (давления) вентилятора Н и расхода воздуха $V_в$ в воздухопроводе, может быть приближенно представлена выражением:

$$H = ZV_в^2, \qquad (5.10)$$

где $V_в$ — расход воздуха, м^3/с; H — напор вентилятора, Па; Z — постоянная величина, зависящая от геометрических форм и размеров воздухопровода машины (по аналогии с электрической цепью Z называют эквивалентным аэродинамическим сопротивлением воздухопровода машины), Па·с^2/м^6.

Вычисление Z может быть произведено согласно [18], однако точное определение Z затруднительно, так как цепь воздухопровода машины состоит из ряда участков, имеющих различные размеры и сложную конфигурацию. Величину Z в значительной мере определяют суммарные площади поперечного сечения отверстий (мм^2) для входа $S_{вх}$ и выхода $S_{вых}$ воздуха из машин, которые целесообразно выбирать по следующим зависимостям:

$$S_{вх} \geqslant 3{,}3D_{н2}^{1{,}65}; \qquad (5.11)$$

$$S_{вых} \geqslant 0{,}55D_{н2}^{1{,}9}. \qquad (5.12)$$

На рис. 5.3 приведены зоны средних значений Z для машин с аксиальной системой вентиляции, составленные с учетом указанных рекомендаций по выбору $S_{вх}$ и $S_{вых}$ после исследования значительного количества машин.

Для центробежного вентилятора, у которого лопасти расположены радиально (здесь и далее рассматриваются только такие вентиляторы), характеристика вентилятора $H = f(V_в)$ приближенно выражается зависимостью

$$H = H_0[1 - (V_в/V_{в\,max})^2]. \qquad (5.13)$$

Здесь H_0 — напор вентилятора при $V_в = 0$, т. е. при закрытых входных отверстиях машины (х.х. вентилятора); $V_{в\,max}$ — максимально возможное для вентилятора количество воздуха при $H = 0$, т. е. при работе вентилятора непосредственно в окружающую среду (к.з. вентилятора). Значения H_0 и $V_{в\,max}$ зависят от размеров вентилятора.

Напор вентилятора (Па)

$$H_0 = \eta_{a0}/(V^2_{вен2} - V^2_{вен1}), \qquad (5.14)$$

где $\eta_{a0} = 0{,}6$ — аэродинамический КПД вентилятора при х.х.; $\gamma = 1{,}23$ кг/м^3 — плотность воздуха.

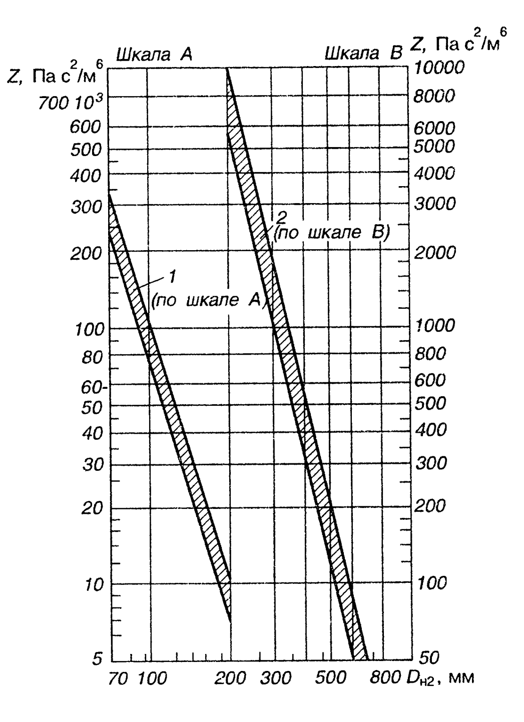


Рис. 5.3. Зоны средних значений $Z=f(D_{H_2})$; *1* — якорь без аксиальных вентиляционных каналов (шкала А); *2* — якорь с аксиальными вентиляционными каналами (шкала В)

Линейная скорость вентилятора (м/с) по наружному диаметру $D_{\text{вен2}}$:

$$v_{\text{вен2}} = \pi D_{\text{вен2}} n/(6 \cdot 10^4); \qquad (5.15)$$

по внутреннему диаметру $D_{\text{вен1}}$:

$$v_{\text{вен1}} = \pi D_{\text{вен1}} n/(6 \cdot 10^4). \qquad (5.16)$$

Максимальный расход воздуха (м³/с)

$$V_{\text{в max}} \approx 0{,}42 v_{\text{вен2}} S_{\text{вен2}}. \qquad (5.17)$$

Площадь поперечного сечения входных отверстий вентилятора (м²)

$$S_{\text{вен}} = 0{,}92\pi D_{\text{вен2}} l_{\text{л}} 10^{-6}, \qquad (5.18)$$

где $l_{\text{л}}$ — длина лопатки, мм.

На рис. 5.4 представлены характеристики воздухопровода машины (2) и характеристика центробежного вентилятора (1). Точка пересечения этих характеристик *А* определяет действительный расход воздуха $V_{\text{в}}$ и напор вентилятора *Н*. Значения $V_{\text{в}}$ и *Н* можно также определить совместным решением уравнений (5.10) и (5.13). Тогда действительные расход воздуха (м³/с) и напор вентилятора (Па) соответственно будут

$$V_{\text{в}} = V_{\text{в max}} [H_0/(H_0 + Z V^2_{\text{в max}})]^{1/2}; \; H = H_0 Z V^2_{\text{в max}}/(H_0 + Z V^2_{\text{в max}}). \qquad (5.19)$$

Необходимый расход воздуха $V_{\text{в}}$ у машин со степенью защиты IP22 или IP23 и способом охлаждения IC01 при радиальной системе вентиляции также можно определить по (5.9).

Приближенный расход (м³/с) воздуха может быть обеспечен радиальной вентиляцией, т. е.

$$V'_{\text{в}} \approx k_1 (D_{\text{н2}}/100)^2 \cdot 10^{-2}, \qquad (5.20)$$

где

$$k_1 = 3{,}5 \cdot (n_1/1000)^{3/4} (n_x l_x + 100)/100 \quad (5.21)$$

— коэффициент, зависящий от частоты вращения n_1.

Должно быть: $V'_в \geq V_в$.

Напор воздуха, развиваемый при радиальной системе,

$$H \approx 7{,}85 (n_1/1000)^2 (D_{н2}/100)^2. \quad (5.22)$$

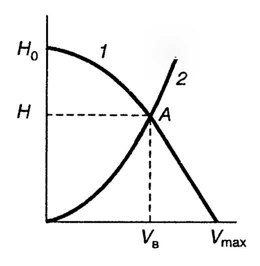


Рис. 5.4. Характеристики центробежного вентилятора (1) и воздухопровода машины (2)

Необходимый расход воздуха у машин со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (м^3/с)

$$V_в = k_2 P'_\Sigma/(c_в \Delta t_в), \quad (5.23)$$

где

$$k_2 = 2{,}2 \cdot (n_1/1000)^{3/4} (D_{корп}/100)^{1/2} \quad (5.24)$$

— коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса машины в зависимости от его диаметра и частоты вращения.

При правильном выборе параметров наружного вентилятора могут быть обеспечены расход (м^3/с) и напор (Па) воздуха соответственно:

$$V'_в \approx 0{,}6 (n_1/1000) (D_{корп}/100)^3 \cdot 10^{-2}; \quad (5.25)$$

$$H \approx 12{,}3 (n_1/1000)^2 (D_{корп}/100)^2. \quad (5.26)$$

Полученное таким образом значение $V'_в$ должно быть больше $V_в$.

Глава 6

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

6.1. Исходные данные для проектирования

Для проектирования асинхронного двигателя должны быть заданы следующие исходные данные:

1. Номинальный режим работы по ГОСТ 183 — 74.
2. Исполнение ротора (короткозамкнутый, фазный).
3. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139 — 84.
4. Количество фаз статора.
5. Способ соединения фаз статора (⅄/Δ; Δ; ⅄).

6. Частота сети.

7. Номинальное линейное напряжение по ГОСТ 21128 — 83.

8. Синхронная частота вращения по ГОСТ 10683 — 73.

9. Степень защиты от внешних воздействий.

10. Способ охлаждения по ГОСТ 20459 — 87.

11. Исполнение по способу монтажа.

12. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150 — 69 и 15543 — 70.

13. Форма выступающего конца вала.

14. Способ соединения с приводимым механизмом.

Кроме того, дополнительно учитывают требования к высоте оси вращения по ГОСТ 13267 — 73 и к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ 18709 — 73 или 20839 — 75.

Содержание перечисленных выше предписаний стандартов приведено в § 1.2. Во всем неоговоренном исходные данные машины должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183 — 74.

Примечание: Количество пар полюсов

$$p = 60 f_1 / n_1.$$

Примеры расчета машин приведены в Приложении 26.

6.2. Магнитная цепь двигателя. Размеры, конфигурация, материал

Главные размеры. Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра D_1 и длины сердечника статора l_1. От главных размеров зависят габариты, масса и другие технико-экономические показатели машины. Предельно допускаемая величина наружного диаметра корпуса $D_{корп}$ (рис. 6.1) и сердечника статора $D_{н1}$ зависит от высоты оси вращения h. Если заданием на проектирование значение h не регламентировано, то его предварительно выбирают из табл. 6.1, данные которой соответствуют существующему в России и за рубежом среднему уровню привязки мощностей к высоте оси вращения h двигателей с разными степенями защиты и способами охлаждения. В табл. 6.1 приведены также значения вращающего момента на валу M_2, поскольку в настоящее время широко распространена более удобная оценка привязки габаритов двигателя к моменту вращения, значение которого для данного

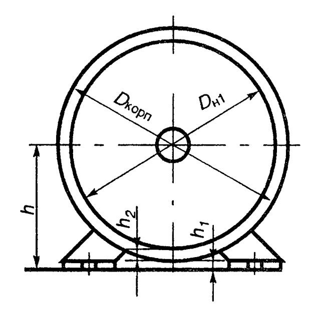


Рис. 6.1. К определению $D_{корп}$ и $D_{н1}$ машин переменного и постоянного тока с шихтованным сердечником статора

типоразмера колеблется в относительно небольших пределах при исполнении двигателя с разным количеством полюсов (за исключением двигателей с $2p=2$).

Таблица 6.1

h, мм	P_2 (кВт) при синхронных частотах вращения, об/мин						M_2, Н·м (при 1500 об/мин)
	3000	1500	1000	750	600	500	
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP44, со способом охлаждения IC0141							
56	0,18	0,12	—	—	—	—	0,77
	0,25	0,18	—	—	—	—	1,15
63	0,37	0,25	0,18	—	—	—	1,59
	0,55	0,37	0,25	—	—	—	2,35
71	0,75	0,55	0,37	0,25	—	—	3,5
	1,1	0,75	0,55	—	—	—	4,74
80	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	7,0
	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	9,5
90	3	2,2	1,5	0,75	—	—	14
100	4	3	2,2	1,5	—	—	19
	5,5	4	—	—	—	—	25,4
112	7,5	5,5	3	2,2	—	—	35
	—	—	4	3	—	—	—
132	11	7,5	5,5	4	—	—	47,4
	—	11	7,5	5,5	—	—	70
160	15	15	11	7,5	—	—	95,3
	18,5	18,5	15	11	—	—	118
180	22	22	18,5	15	—	—	140
	30	30	—	—	—	—	190
200	37	37	22	18,5	—	—	234 5
	45	45	30	22	—	—	284
225	55	55	37	30	—	—	349
250	75	75	45	37	—	—	474
	90	90	55	45	—	—	574
280	110	110	75	55	—	—	699
	132	132	90	75		—	838
315	160	160	110	90	55	45	1018
	200	200	132	110	75	55	1267

355	250	250	160	132	90	75	1592
	315	315	200	160	110	90	2006
400	—	315	250	200	—	—	2006
	—	400	315	250	200	—	2545
	—	500	400	—	—	—	3183
450	—	630	500	315	250	200	4012
	—	800	630	400	315	250	5094
	—	—	—	500	—	—	—

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01

160	22	18,5	11	7,5	—	—	118
	30	22	15	11	—	—	140
180	37	30	18,5	15	—	—	190
	45	37	22	18,5	—	—	235
200	55	45	30	22	—	—	284
	75	55	37	30	—	—	349
225	90	75	45	37	—	—	474
250	110	90	55	45	—	—	574
	132	110	75	55	—	—	699
280	160	132	90	75	—	—	838
	200	160	110	90	—	—	1018
315	—	200	132	110	75	55	1267
	200	250	160	132	90	75	1592
355	315	315	200	160	110	90	2005
	400	400	250	200	132	110	2550
400	—	400	315	—	—	—	2550
	—	500	400	250	200	—	3183
	—	630	500	315	250	—	4010
450	—	800	630	400	315	250	5093
	—	1000	800	500	400	315	6367
	—	—	—	630	—	—	—

Асинхронные двигатели с фазным ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01

200	—	37	22	18,5	—	—	235
	—	45	30	22	—	—	284
225	—	55	37	30	—	—	349
	—	75	45	37	—	—	474

250	—	90	55	45	—	—	574
	—	110	75	55	—	—	699
280	—	132	90	75	45	—	838
	—	160	110	90	55	—	1018
315	—	200	132	110	75	55	1267
	—	250	160	132	90	75	1592
355	—	315	200	160	110	90	2006
	—	400	250	200	132	110	2547
400	—	400	315	250	200	—	2547
	—	500	400	315	250	—	3193
	—	630	500	—	—	—	4012
450	—	800	630	400	315	250	5094
	—	1000	800	500	400	315	6367
	—	—	—	630	—	—	—

Примечание. Электродвигатели с $h \geqslant 400$ мм изготавливают на напряжение $U = 6000$ В.

Для удобства выбора наружного диаметра сердечника $D_{н1}$ при заданной или выбранной стандартной высоте оси вращения h в табл. 6.2 приведены предельно допустимые значения $D_{н1\,max}$ для $h = 50 \div 450$ мм, указаны припуски на штамповку $\Delta_{шт}$, а также ширина резаных лент и стандартной рулонной стали, из которых штампуют листы сердечника.

Таблица 6.2

h, мм	h_1, мм	h_2, мм	$D_{н1\,max}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина при однорядной штамповке, мм		h, мм	h_1, м	h_2, мм	$D_{н1\,max}$, мм	$\Delta_{шт}$, мм	Ширина при однорядной штамповке, мм	
					резаных лент	рулонной стали						резаных лент	рулонной стали
50	3	4	86	4	90	—	180	7	12	322	7	330	—
56	4	4	96	4	100	—	200	7	13,5	359	8	367	—
63	4	5	108	5	113	—	225	7	15	406	8	414	—
71	4	6	122	5	127	—	250	8	16	452	8	460	—
80	4	6,5	139	6	145	—	280	8	12	520	10	—	530
90	5	6,5	157	6	163	—	315	7	13	590	10	—	600
100	5	7,5	175	7	182	—	355	10	15	660	10	—	670
112	5	8,5	197	7	204	—	400	14	16	740	10	—	750
132	6	9,5	233	7	240	—	450	9	16	850	10	—	860
160	6	11,5	285	7	292	—							

При составлении табл. 6.2 имелось в виду, что двигатели с $h=50\div250$ мм выполняются с литыми станинами, а двигатели с $h=280\div450$ мм — со сварными.

При $D_{н1}\leqslant452$ мм (что соответствует $h\leqslant250$ мм) листы статора штампуют из резаной ленты, которая по согласованию сторон может поставляться различной ширины, но не превышающей 500 мм. При $D_{н1}>452$ мм листы статора штампуют из рулонной стали стандартной ширины, указанной в § 2.3.

Для определения одного из главных размеров — внутреннего диаметра сердечника статора D_1 — можно использовать зависимости $D_1=f(D_{н1})$, приведенные в табл. 6.3. При проектировании части серии (двух двигателей и более на одном диаметре $D_{н1}$) для облегчения производства необходимо унифицировать при данном количестве полюсов основные размеры магнитопровода двигателя в его поперечном сечении — диаметры $D_{н1}$, D_1, $D_{н2}$, а также количество и размеры пазов статора и ротора.

Расчетную (внутреннюю мощность) P' определяют по формуле

$$P'=m_1E_1I_1=m_1k_нU_1I_1=k_нP_1=k_нP_2/(\eta'\cdot\cos\varphi'). \quad (6.1)$$

Значение $k_н$ ($k_н=E_1/U_1$, где U_1 — номинальное фазное напряжение, В) — коэффициента нагрузки — находят из рис. 6.2; I_1, E_1 — ток и ЭДС фазы обмотки статора A, B; m_1 — число фаз обмотки статора; η'; $\cos\varphi'$ — предварительные значения КПД и коэффициента мощности при номинальной нагрузке, о. е.

Предварительные значения η' и $\cos\varphi'$ для двигателей с короткозамкнутым ротором могут быть приняты на уровне средних энергетических показателей выпускаемых электродвигателей (рис. 6.3 и 6.4) или по ГОСТ 19523 — 74*.

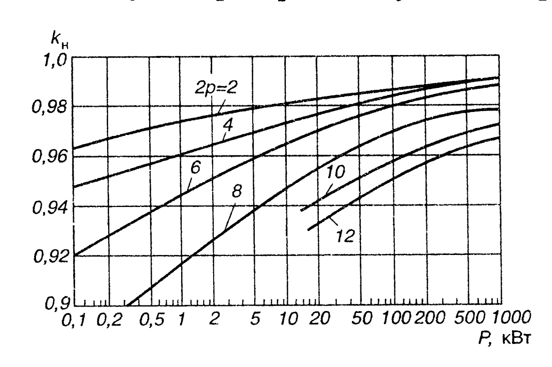


Рис. 6.2. Средние значения $k_н=f(P_2)$ асинхронных двигателей

Для двигателей с фазным ротором исполнения по защите IP23 предварительные значения η' могут быть приняты на 0,005 ниже, чем по рис. 6.3, а $\cos\varphi$ на 0,01 ниже, чем по рис. 6.4.

---

* Здесь и далее предварительные значения параметров обозначаются знаком «штрих» для отличия уточняемых в дальнейшем значений.

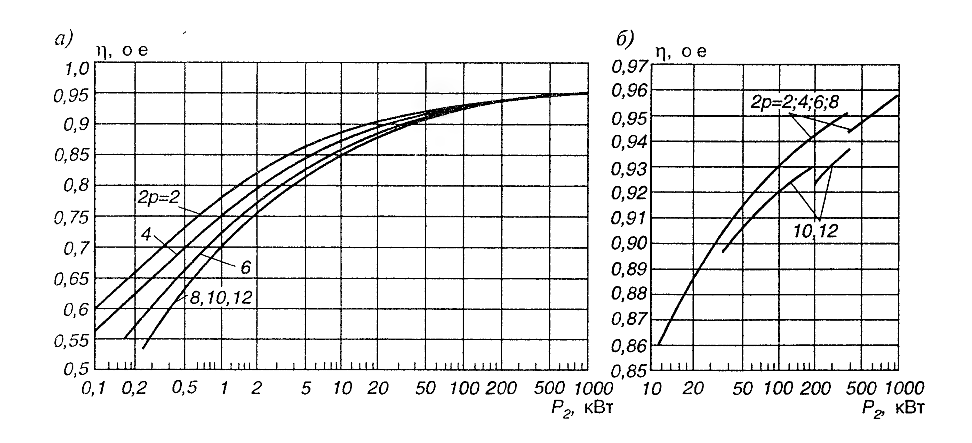


Рис. 6.3. Средние значения $\eta = f(P_2)$ асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: *а* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *б* — исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

Таблица 6.3

$2p$	$D_{н1}$, мм	$D_1 = f(D_{н1})$, мм
2	80 — 360	$D_1 = 0{,}61 \quad D_{н1} - 4$
	Свыше 360 — 750	$D_1 = 0{,}485 \quad D_{н1} + 28$
4	80 — 520	$D_1 = 0{,}68 \quad D_{н1} - 5$
	Свыше 520 — 990	$D_1 = 0{,}56 \quad D_{н1} + 60$
6	80 — 590	$D_1 = 0{,}72 \quad D_{н1} - 3$
	Свыше 590 — 990	$D_1 = 0{,}6 \quad D_{н1} + 82$
8	80 — 590	$D_1 = 0{,}72 \quad D_{н1} - 3$
	Свыше 90 — 990	$D_1 = 0{,}6 \quad D_{н1} + 100$
10 и 12	500 — 990	$D_1 = 0{,}6 \quad D_{н1} + 110$

Для определения второго главного размера — длины сердечника статора l_1 — вначале находят расчетную длину сердечника l_1 (с соответствующим округлением). При этом следует задать предварительные значения обмоточного коэффициента $k'_{об1}$ ($k'_{об1} = 0{,}91 - 0{,}94$ для $2p \geqslant 4$; $k'_{об1} = 0{,}97$ для $2p = 2$, большие значения $k'_{об1}$ принимают для двигателей меньшей мощности), а также электромагнитных нагрузок A'_1 (линейной нагрузки статора) и B'_δ (максимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл). Значения A'_1 и B'_δ зависят от ряда факторов, в том числе от формы пазов и типа обмотки.

$$l'_1 = 8{,}62 \cdot 10^7 \cdot P' / (D_1{}^2 n_1 A_1 B_\delta k_{об1}). \tag{6.2}$$

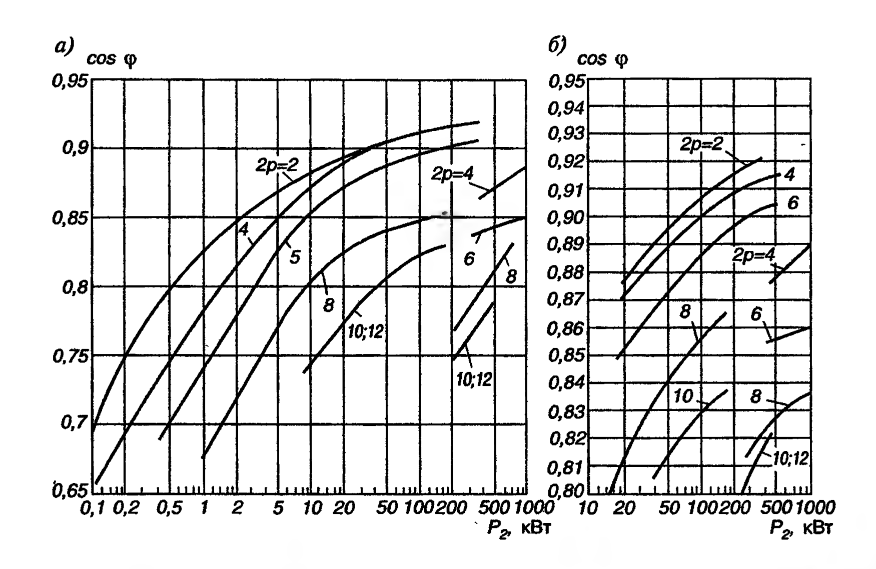


Рис. 6.4. Средние значения $\cos\varphi$ асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: *а* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141; *б* — исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

В табл. 6.4 указаны применяемые в настоящее время формы пазов и типы обмоток статора.

Таблица 6.4

Высота оси вращения *h*, мм	Форма паза	Тип обмотки
50 — 160	Трапецеидальные полузакрытые	Однослойная всыпная концентрическая
180 —250 280 — 315 ($2p$=10; 12)	То же »	Двухслойная или однодвухслойная всыпная
280 — 355 ($2p$=2; 4; 6; 8)	Прямоугольные полуоткрытые	Двухслойная из жестких катушек
355 ($2p$=10; 12)	То же	То же
400 — 450	Прямоугольные открытые	Двухслойная из жестких катушек

Форма пазов, указанная в табл. 6.4, определяется тем, что статоры с прямоугольными (открытыми или полуоткрытыми) пазами обладают большей надежностью обмотки, выполняемой из жестких изолированных катушек, а также бо́льшим коэффициентом заполнения пазов медью проводов прямоугольного поперечного сечения. Однако со снижением *h* возникают технологические за-

труднения, ограничивающие возможность применения прямоугольных пазов статора, из-за уменьшения поперечного сечения проводов и ширины зубца в наиболее узком месте.

Поэтому в асинхронных двигателях, начиная примерно с $D_{н1} \leqslant 452$ мм (что соответствует $h \leqslant 250$ мм), выполняют полузакрытые пазы трапецеидальной формы со всыпной обмоткой из проводов круглого поперечного сечения, при которых коэффициент заполнения паза медью снижается. Компенсирует в некоторой степени указанное снижение возможность получения зубцов равновеликого сечения и постоянства магнитной индукции по высоте зубца, в отличие от прямоугольных пазов, при которых зубец имеет трапецеидальную форму и магнитную индукцию, увеличивающуюся в направлении основания паза.

При заданных мощности и частоте вращения объем сердечника машины зависит в основном от электромагнитных нагрузок: чем

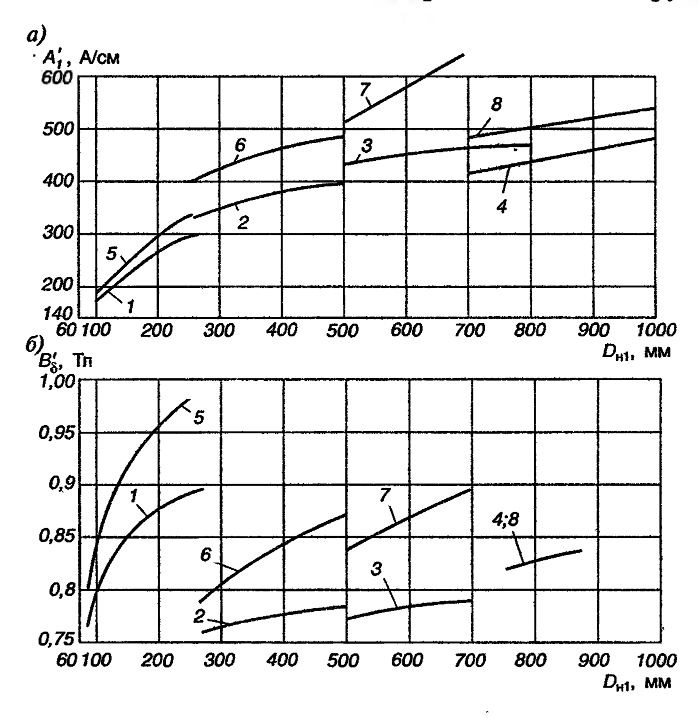


Рис. 6.5. Средние значения $A'_1 = f(D_{н1})$ (*а*), $B'_\delta = f(D_{н1})$ (*б*) при $2p = 4$ и классе нагревостойкости *F*: *1* — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *2* — то же, что *1*, но двухслойная обмотка; *3* — IP44, IC0141, полузакрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; *4* — IP44, IC0141, открытые пазы, $U = 6000$ В, двухслойная обмотка; *5* — IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *6* — то же, что *5*, но двухслойная обмотка; *7* — IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; *8* — IP23, IC01, открытые пазы, $U = 6000$ В, двухслойная обмотка

больше A и B_δ, тем меньше главные размеры и выше использование активных материалов в машине. Однако увеличение электромагнитных нагрузок, сопровождаемое повышением температуры активных частей машины, ограничивается классом нагревостойкости изоляции. При выборе электромагнитных нагрузок следует учитывать, что отношение A/B_δ должно быть в определенных пределах, так как его значение влияет на технико-экономические показатели машины — КПД, $\cos\varphi$, пусковые характеристики и массу.

На рис. 6.5 приведены средние значения A'_1 и B'_δ для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами при $2p=4$ и с изоляцией класса нагревостойкости F. При количестве полюсов, отличающихся от $2p=4$, принимаемые из рис. 6.5 значения A'_1 и B'_δ умножают на поправочные коэффициенты k_1 и k_2 (табл. 6.5). Кроме того, при выполнении электродвигателей с изоляцией классов нагревостойкости B или H значение A'_1, принятое по рис. 6.5 с учетом k_1, должно быть умножено на поправочный коэффициент k_3 (для класса B — $k_3=0{,}86$; для класса H — $k_3=1{,}14$).

Таблица 6.5

Коэффициенты	Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$, мм	Коэффициенты при различных значениях $2p$			
			2	6	8	10 и 12
k_1 (для A'_1)	IP44, IC0141	Свыше 80 — 250	0,93	1,0	1,0	—
		» 250 — 500	1,1	0,93	0,93	—
		» 500 — 700	1,1	0,915	0,915	0,84
		» 700 — 990	—	0,92	0,87	0,84
	IP23, IC01	» 250 — 500	1,16	0,9	0,84	0,72
		» 500 — 700	1,15	0,89	0,84	0,72
		» 700 — 990	—	0,9	0,88	0,85
k_2 (для B'_δ)	IP44, IC0141	» 80 — 250	1,0	1,0	1,2	
		» 250 — 700	0,96	1,04	1,04	1,04
		» 700 — 990	—	0,96	0,94	0,92
	IP23, IC01	» 250 — 700	0,98	1,02	1,02	1,04
		» 700 — 990	—	0,97	0,94	0,925

Следует иметь в виду, что при современных высоких требованиях к величинам пусковых моментов электродвигателей с $h\leqslant 132$ мм может возникнуть необходимость проектирования двигателей с пониженными значениями A'_1.

Конструктивная длина сердечника статора l_1 при отсутствии в сердечнике радиальных вентиляционных каналов равна расчетной длине l'_1, округленной до ближайшего целого числа (при длине менее 100 мм) и до ближайшего числа, кратного пяти (при длине более 100 мм); соответственно изменяется значение l_1. При длине

сердечника более 300 — 350 мм применяются радиальные вентиляционные каналы. В этом случае l_1 определяется как

$$l_1 = l'_1 + n_{к1} l_{к1} \tag{6.3}$$

с округлением до ближайшего числа, кратного пяти. Количество вентиляционных каналов $n_{к1}$ определяется длиной одного пакета сердечника статора $l_{п1}$, выбираемой в пределах 55 — 75 мм при длине вентиляционного канала $l_{к1} = 10$ мм. Отношение

$$\lambda = l_1 / D_1 \tag{6.4}$$

целесообразно выбирать таким, чтобы оно приближалось к предельному допускаемому отношению λ_{max}, вычисляемому для двигателей с $2p = 4$ по формулам, приведенным в табл. 6.6. При количестве полюсов, отличающихся от $2p = 4$, значение λ_{max}, полученное из табл. 6.6, должно быть умножено на поправочный коэффициент k_4 для электродвигателей со степенями защиты IP23 и IP44 (табл. 6.7).

Таблица 6.6

Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$, мм	Значения λ_{max}
IP44, IC0141	80 — 700	$1{,}46 - 0{,}00071 D_{н1}$
IP23, IC01	250 — 700	$1{,}33 - 0{,}00087 D_{н1}$
IP4, IC0141, IP23, IC01	Свыше 700 — 990	$1{,}56 - 0{,}0008801 D_{н1}$

Следует учитывать, что величина λ влияет на массу, динамический момент инерции вращающейся части, энергетические и другие технико-экономические показатели машины.

Таблица 6.7

$D_{н1}$, мм	Коэффициенты при различных значениях $2p$		
	2	6	8, 10 и 12
80 — 700	0,95	1,05	1,1
Свыше 700 — 990	—	—	1,15

Влияние это может быть различным и порой противоречивым, например, при увеличении λ, т. е. при уменьшении D и увеличении l падает динамический момент инерции, ускоряется процесс пуска и торможения двигателя и соответственно снижаются потери, возникающие при этом процессе. При увеличении λ уменьшаются масса лобовых частей обмоток и потери в них. Следовательно,

у машин с большими значениями λ масса, приходящаяся на единицу мощности или момента вращения, снижается, а КПД растет.

Вместе с тем у вентилируемых машин с большими значениями λ ухудшаются условия охлаждения и может возникнуть необходимость в увеличении диаметра вала для обеспечения его достаточной жесткости и прочности. При достижении больших значений λ может возрасти трудоемкость изготовления, а следовательно, и себестоимость машины.

Если λ превышает λ_{max}, то необходимо перейти на другую, большую стандартную высоту оси вращения и повторить расчет главных размеров и λ.

При проектировании участка серии с двумя или тремя длинами сердечника статора на одном диаметре значение λ электродвигателя большей мощности должно приближаться к λ_{max}, но не превышать его; значение λ электродвигателя меньшей мощности не регламентируется. В отдельных случаях, например у тихохоходных машин, значение λ_{max} может быть увеличено по сравнению с рекомендуемыми по табл. 6.6 и 6.7, но с соответствующей проверкой механической жесткости и прочности вала.

Сердечник статора. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, имеющих изоляционные покрытия для уменьшения потерь в стали от вихревых токов. Для сердечников рекомендуется применять следующие марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали:

Высота оси вращения, мм	50 — 250	280 — 355	400 — 450
Марка стали	2013	2312	2411

Для стали 2013 обычно используют изолирование листов оксидированием (коэффициент заполнения стали $k_c = 0,97$), для стали 2312 и 2411 — лакировкой ($k_c = 0,95$) или термостойким электроизоляционным покрытием листов ($k_c = 0,96 — 0,97$). Количество пазов сердечника статора

$$z_1 = 2pm_1q_1 \tag{6.5}$$

зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу

$$q_1 = z_1/(2pm_1). \tag{6.6}$$

Обычно q_1 выбирают равным целому числу. Только для унификации листов статора двигателей с разным количеством полюсов и для тихоходных двигателей иногда применяют дробное q_1 (1,5; 2,5 и др.). В табл. 6.8 приведены рекомендуемые значения q_1.

Таблица 6.8

$2p$	Количество пазов на полюс и фазу q_1 при различных значениях h, мм		
	50 — 132	160 — 225	250 — 450
2	3; 4	5; 6	7; 8
4	2; 3	3; 4	4; 5
6	2; 3	3; 4	4; 5
8	1,5; 2	2; 3	3; 4
10	—	—	2; 3
12	—	—	2; 2,5

По выбранному значению q_1 определяют z_1 в соответствии с (6.5). При этом целесообразно использовать опыт по серии 4А (см. табл. 6.12).

Сердечник ротора. Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Марки стали и изоляционные покрытия такие же, как в статоре.

В короткозамкнутом роторе применяют закрытые, полузакрытые и открытые пазы. Для уменьшения влияния моментов высших гармоник на пусковые и виброакустические характеристики машин роторы двигателей с высотами оси вращения $h \leqslant 160$ мм имеют скос пазов $b_{ск1}$ на одно зубцовое деление статора t_1; при этом $\beta_{ск1}=1$. Двигатели с большими высотами оси вращения обычно выполняют без скоса пазов.

Наружный диаметр сердечника ротора (мм)

$$D_{н2}=D_1-2\delta, \tag{6.7}$$

где δ — воздушный зазор между статором и ротором, мм.

Величину воздушного зазора выбирают с учетом противоречивых требований, так как, с одной стороны, при увеличении воздушного зазора уменьшается коэффициент мощности, а с другой — увеличиваются фактический КПД и надежность двигателя, снижается нагрев обмоток, уменьшаются добавочные потери, уровень шума и вибраций магнитного происхождения, возможность задевания ротора о статор.

Таблица 6.9

h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$				h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$			
	2	4	6 и 8	10 и 12		2	4	6 и 8	10 и 12
50	0,25	0,25	0,25	—	180	1,0	0,6	0,45	—
56	0,3	0,25	0,25	—	200	1,0	0,7	0,5	—
63	0,35	0,25	0,25	—	225	1,0	0,85	0,6	—
71, 80	0,35	0,25	0,25	—	250	1,2	1,0	0,7	—

h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$				h, мм	δ (мм) при различных значениях $2p$			
	2	4	6 и 8	10 и 12		2	4	6 и 8	10 и 12
90	0,4	0,25	0,25	—	280	1,3	1,0	0,8	0,7
100	0,45	0,3	0,3	—	315	1,5	1,0	0,9	0,8
112	0,5	0,3	0,3	—	355	1,8	1,2	1,0	0,9
132	0,6	0,35	0,35	—	400	2,0	1,4	1,2	1,0
160	0,8	0,5	0,5	—	450	2,0	1,4	1,2	1,0

В табл. 6.9 приведены средние значения воздушного зазора δ, принятые в современных сериях асинхронных двигателей.

Для высот осей вращения $h \geqslant 71$ мм внутренний диаметр листов ротора

$$D_2 \approx 0{,}23 D_{н1}; \qquad (6.8)$$

для высот осей вращения $h = 50$ и 63 мм:

$$D_2 \approx 0{,}19 D_{н1}. \qquad (6.9)$$

После расчета вала на жесткость размер D_2 уточняют.

Для улучшения охлаждения, уменьшения массы и динамического момента инерции ротора в сердечниках ротора с $h \geqslant 250$ мм предусматривают круглые аксиальные вентиляционные каналы в соответствии с данными табл. 6.10. У двигателей с меньшей высотой оси вращения аксиальные каналы обычно не предусматривают из-за повышения при этом магнитной индукции в спинке ротора.

Таблица 6.10

h, мм	Количество $n_{к2}$ и диаметр $d_{к2}$ (мм) вентиляционных каналов при различных значениях $2p$							
	2		4		6		8, 10 и 12	
	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$
250	10	15	10	20	10	30	10	30
280	12	20	12	32	12	40	12	40
315	12	20	12	40	12	40	12	40
355	12	20	12	50	12	50	12	50
400	—	—	9	55	9	65	9	75
450	—	—	9	65	9	75	9	90

Длину сердечника ротора l_2 принимают равной длине сердечника статора l_1 для $h \leqslant 250$ мм, а для $h > 250$ мм $l_2 = l_1 + 5$ мм. Радиальные вентиляционные каналы в роторе выполняют при $l_2 > 350$ мм. Коли-

чество, размеры и расположение этих каналов в роторе такое же, как в сердечнике статора.

Количество пазов z_2 для двигателей с короткозамкнутым ротором выбирают в зависимости от z_1 и наличия скоса пазов в роторе. В табл. 6.11 приведены рекомендуемые количества пазов z_2. Соотношения получены в результате теоретических и экспериментальных исследований. Отступление от рекомендованных соотношений z_1/z_2 может привести к недопустимым провалам в характеристике пускового момента, к повышенным шумам и вибрациям.

Количество пазов в сердечнике ротора для двигателей с фазным ротором

$$z_2 = 2pm_2q_2, \tag{6.10}$$

здесь q_2 зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу ротора q_1. Обычно (если это не оговорено в исходных данных) принимают $m_2 = m_1$ и $q_2 = q_1 \pm 1$. Если при этом q_2 получается слишком большим или малым, то принимают $q_2 = q_1 \pm 0{,}5$.

Таблица 6.11

$2p$	z_1	z_2	
		пазы без скоса	пазы со скосом
2	18	15, 21, 22	19, 22, 26, 28, 31, 33, 34, 35
	24	15, 17, 19, 32	19, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	20, 21, 23, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 28, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	24	16, 17	16, 18, 28, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 38, 44, 46	27, 28, 30, 34, 38, 45, 48
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	38, 40, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46	28, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	36	—	28
	48	36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, 70, 98, 100, 102, 104	—
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113

2p	z_1	z_2	
		пазы без скоса	пазы со скосом
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	108, 110	—
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104	99, 101, 103, 117, 123, 137
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	86, 87, 93, 94
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112

В табл. 6.12 приведены соотношения количества пазов z_1/z_2, принятые в серии 4А.

Таблица 6.12

h, мм	z_1/z_2 при различном 2*p*					
	2	4	6	8	10	12
Двигатели с короткозамкнутым ротором						
50 — 63	24/19	24/18	36/28	—	—	
71	24/19	24/18	36/28	36/28	—	—
80 — 100	24/19	36/28	36/28	36/28	—	—
112 — 132	24/19	36/34	54/51	48/44	—	—
160	36/28	48/38	54/51	48/44	—	—
180 — 200	36/28	48/38	72/58	72/58	—	—
225	36/28	48/38	72/56	72/56	—	—
250	48/40	60/50	72/56	72/56	—	—
280 — 355	48/38	60/70	72/82	72/86	90/106	90/106
400 — 450	—	60/70	72/84	72/86	90/106	90/106
Двигатели с фазным ротором						
200	—	48/36	72/54	72/48	—	—
225	—	48/66	72/81	72/84	—	—
250	—	60/72	72/81	72/84	—	—
280 — 355	—	60/72	72/81	72/84	90/120	90/108
400 — 450	—	60/72	72/90	72/96	90/120	90/126

6.3. Обмотка статора

Типы обмоток и общие положения. В асинхронных двигателях с $h \leqslant 160$ мм обычно выполняют однослойные всыпные обмотки, а в двигателях с $h > 160$ мм — двухслойные (из мягких секций или из жестких катушек). В табл. 6.4 указаны типы используемых обмоток и соответственно форма пазов. При выполнении двигателей с однослойными обмотками облегчается применение автоматических обмоточных станков, а при изготовлении их с двухслойными обмотками с укороченным шагом — улучшается форма кривой поля и уменьшается расход меди на лобовые части обмотки. Однослойную обмотку выполняют концентрической. Для механизации обмоточных работ в электродвигателях с $h > 160$ мм используют разносекционные одно- и двухслойные концентрические обмотки [4; 13].

Высоковольтные электродвигатели выполняют с открытыми пазами. По высоте паза укладывают две катушки, а прямоугольные проводники располагают плашмя. Конструкция обмоток статора описана в § 3.6. Основные свойства разных типов обмотки статора, в том числе условия их симметрии, подробно освещены в [4; 13]. На рис. 6.6 показаны схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора, а на рис. 6.7 — схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора. Обычно обмотку статора выполняют шестизонной; каждая зона равна 60 эл. град. При шестизонной обмотке коэффициент распределения

$$k_{p1} = 0{,}5/[q_1 \sin(\alpha/2)], \qquad (6.11)$$

где $\alpha = 60°/q_1$.

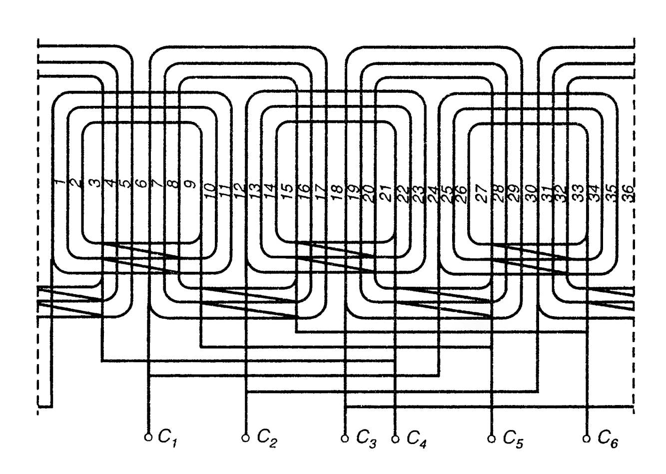


Рис. 6.6. Схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора
$z_1 = 36$; $2p = 4$; $q_1 = 3$; $y_{п1} = 7, 9, 11$

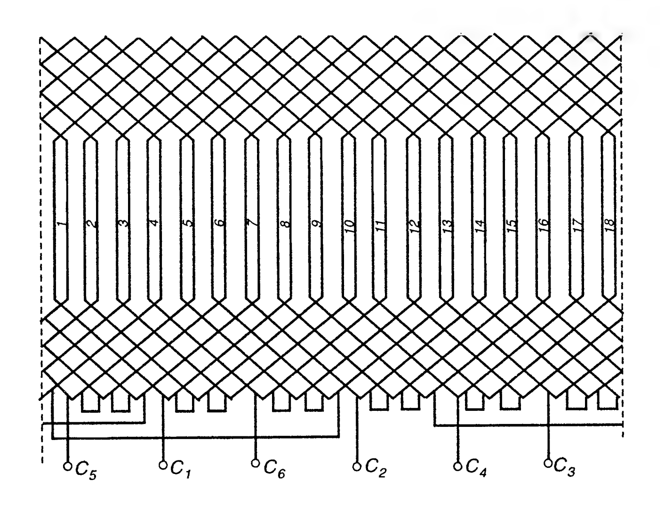


Рис. 6.7. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора $z_1=18$; $2p=2$; $q_1=3$; $y_{п1}=7$

Однослойную обмотку выполняют с диаметральным шагом по пазам

$$y_{п1}=z_1/(2p). \tag{6.12}$$

Двухслойную обмотку выполняют с укороченным шагом

$$y_{п1}=\beta_1 z_1/(2p). \tag{6.13}$$

Укорочение шага β_1 выбирают таким образом, чтобы $y_{п1}$ равнялось целому числу; $\beta_1\approx 0{,}6$ при $2p=2$ или $\beta_1\approx 0{,}8$ при $2p\geqslant 4$.

Коэффициент укорочения

$$k_{у1}=\sin(\beta_1\cdot 90°). \tag{6.14}$$

При однослойной обмотке с диаметральным шагом $\beta_1=1$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{об1}=k_{р1}\cdot k_{у1}. \tag{6.15}$$

Предварительное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi'=B'_\delta D_1 l'_1 10^{-6}/p, \tag{6.16}$$

где l'_1 — округленное значение расчетной длины сердечника статора; при отсутствии радиальных вентиляционных каналов l'_1 принимается равным l_1.

Предварительное количество витков в обмотке фазы

$$\omega'_1 = k_н U_1/[222 k_{об1} (f_1/50) \Phi'].\qquad(6.17)$$

Предварительное количество эффективных проводников в пазу

$$N'_{п1} = \omega'_1 a_1/(pq_1),\qquad(6.18)$$

где a_1 — количество параллельных ветвей обмотки статора, которое должно быть одним из делителей числа полюсов, например, при $2p = 12$ возможные значения $a_1 = 1; 2; 3; 4; 6$.

Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое количество витков, а стороны катушек — находиться в магнитном поле в одинаковых условиях. При малом значении $N'_{п1}$ и вызванных этим трудностях с расположением проводов в пазу увеличение значения a_1 позволяет соответственно повысить $N'_{п1}$. Полученное из (6.18) значение $N'_{п1}$ округляют до ближайшего целого числа $N_{п1}$. При двухслойной обмотке $N_{п1}$ должно быть выбрано, как правило, четным. Однако при малых значениях $N_{п1}$, например $N_{п1} = 6; 8$, иногда приходится выбирать $N_{п1}$ нечетным. При этом катушки имеют разное количество проводников, отличающееся на единицу. Применяя обмотки с разновитковыми катушками, следует обращать внимание на необходимость образования симметричных параллельных ветвей.

Выбрав целое число $N_{п1}$, уточняют предварительно установленные параметры ω'_1, A'_1 и B'_δ:

$$\omega_1 = N_{п1} p q_1/a_1.\qquad(6.19)$$

Уточненное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi = \Phi' \omega'_1/\omega_1.\qquad(6.20)$$

Уточненное значение индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = B'_\delta \omega'_1/\omega_1.\qquad(6.21)$$

Предварительное значение номинального фазного тока (А)

$$I_1 = P_2 \cdot 10^3/(3 U_1 \eta' \cos\varphi').\qquad(6.22)$$

Уточненная линейная нагрузка статора (А/см)

$$A_1 = 10 N_{п1} z_1 I_1/(\pi D_1 a_1).\qquad(6.23)$$

Полученное по (6.21) значение A_1 не должно отличаться от предварительно принятого A'_1 более чем на 10%; иначе следует изменить количество витков ω_1.

Таблица 6.13

h, мм	$2p$	B_{c1}, Тл
50 — 250	2; 4 6 8	1,55 — 1,75 1,4 — 1,6 1,1 — 1,3
280 — 355	2; 4; 6; 8 10; 12	1,45 — 1,65 1,2 — 1,4
400 — 450	4; 6; 8 10; 12	1,3 — 1,5 1,1 — 1,3

Таблица 6.14

h, мм	$2p$	$B_з$: для двигателей со степенью защиты, Тл	
		IP44	IP23
50 — 132	2; 4; 6; 8	1,75 — 1,95	1,8 — 2,0
160—250	2 4; 6; 8	1,75 — 1,95 1,6 — 1,8	1,9 — 2,1 1,7 — 1,9
280—315	10; 12	1,6 — 1,8	1,7 — 1,9

Проектирование обмотки ведут при одновременном определении размеров зубцовой зоны. Для определения высоты паза сначала находят высоту спинки статора h_{c1}. Средние значения магнитной индукции в спинке статора B_{c1} приведены в табл. 6.13.

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора (мм)

$$t_1 = \pi D_1 / z_1. \qquad (6.24)$$

Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами. Полузакрытые пазы статора обычно имеют трапецеидальную форму (рис. 6.8), при этом размеры b_1 и b_2 выбирают такими, чтобы стенки зубцов были параллельными ($b_{з1} = \text{const}$). Постоянство магнитной индукции по высоте зубца уменьшает МДС на участке зубца. Кроме того, при полузакрытых пазах коэффициент воздушного зазора и добавочные потери меньше, чем при открытых пазах или полуоткрытых.

Недостаток полузакрытых трапецеидальных пазов заключается в том, что в них укладывают всыпную обмотку из круглого провода. Это понижает коэффициент заполнения паза и надежность обмотки. Для определения ширины зубца $b_{з1}$ следует принять средние значения магнитной индукции в зубцах статора $B_{з1}$ по табл. 6.14.

Ширина зубца (мм)

$$b_{з1} = t_1 B_\delta / (k_c B_{з1}). \qquad (6.25)$$

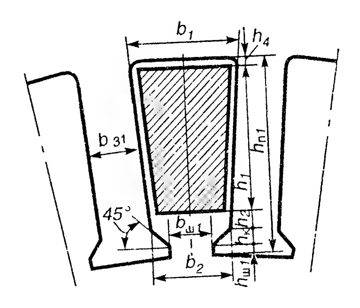


Рис. 6.8. Трапецеидальный полузакрытый паз статора

При сборке сердечника размеры пазов в штампе и в свету (после сборки сердечника) не совпадают из-за неизбежного смещения листов друг относительно друга. Припуски на сборку сердечников статора и ротора электродвигателей с $h = 50$ — 132 мм по ширине b_c и по высоте h_c составляют 0,1 мм; с $h = 160$ —

250 мм b_c и $h_c=0,2$ мм; с $h=280$ — 355 мм b_c и $h_c=0,3$ мм; с $h=400$ — 450 мм b_c и $h_c=0,4$ мм.

Размеры трапецеидальных пазов определяют в следующей последовательности:

Высота спинки статора (мм)	$h_{c1}=\Phi\cdot 10^6/(2k_c l_1 B_{c1})$	(6.26)
Высота паза (мм)	$h_{п1}=(D_{н1}-D_1)/2-h_{c1}$	(6.27)
Большая ширина паза (мм)	$b_1=\pi(D_1+2h_{п1})/z_1-b_{з1}$	(6.28)
Меньшая ширина паза (мм)	$b_2=(\pi(D_1+2h_{ш1}-b_{ш1})-z_1 b_{з1})/(z_1-\pi)$	(6.29)
Проверка правильности определения b_1 и b_2, исходя из требования $b_{з1}=\text{const}$	Условие: $z_1(b_1-b_2)+$ $+\pi(b_2-b_{ш1})-2\pi(h_{п1}-h_{ш1})\approx 0$	(6.30)
Площадь поперечного сечения паза в штампе (мм^2)	$S_{п1}=((b_1+b_2)/2)(h_{п1}-h_{ш1}-(b_2-b_{ш1})/2)$	(6.31)
Площадь поперечного сечения паза в свету (мм^2)	$S'_{п1}=(b_1+b_2-2b_c)(h_{п1}-h_{ш1}-h_c-$ $-(b_2-b_{ш1})/2)/2$	(6.32)
Площадь поперечного сечения корпусной изоляции (мм^2)	$S_{и}=b_{и1}(2h_{п1}+b_1+b_2)$	(6.33)
Площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином (мм^2)	$S_{пр}=0,5b_1+0,75b_2$	(6.34)
Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой (мм^2)	$S''_{п1}=S'_{п1}-S_{и}-S_{пр}$	(6.35)

В формулах (6.26) — (6.35) $h_{ш1}=0,5$ мм — высота шлица; $b_{ш1}$ — ширина шлица, мм; $b_{и1}$ — среднее значение односторонней толщины корпусной изоляции:

h, мм	50—80	90—132	160—250	280—315
$b_{и1}$, мм	0,2	0,25	0,4	0,58

Предварительное значение ширины шлица

$$b'_{ш1}\approx 0,3h^{1/2}. \qquad (6.36)$$

После выбора диаметра изолированного обмоточного провода d' определяют значение $b''_{ш1}$ по (6.40) и вносят при необходимости коррективы в расчеты по формулам (6.29) — (6.32).

Для обмоток статора применяют провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости В), провода ПЭТ-155 (класс F) и ПЭТ-200 (класс Н). При механизации обмоточных работ применяют провода с ме-

ханически более прочной изоляцией марок ПЭТВМ, ПЭТМ-155 и ПЭТМ-200 соответственно.

Диаметр провода выбирают таким, чтобы коэффициент заполнения паза $k_п$ не превышал 0,75 (при ручной укладке) и 0,72 (при машинной на статорообмоточных станках). Коэффициент заполнения паза

$$k_п = N_{п1} c (d_1)^2 / S'_{п1}, \tag{6.37}$$

где c — количество элементарных проводов в одном эффективном; d' — диаметр элементарного изолированного провода, мм.

Задавшись $k_п$, определяют произведение

$$c (d')^2 = k_п S_{п1}'' / N_{п1}. \tag{6.38}$$

Число c выбирают, исходя из условия, чтобы диаметр провода с изоляцией d' не превышал 1,71 мм при ручной укладке и 1,33 мм при машинной. Причина этого ограничения заключается в затруднении с укладкой проводов большего диаметра в пазы.

При значениях $k_п$, больших допустимого, увеличиваются механические воздействия при укладке обмотки в пазы и в связи с этим возрастает опасность повреждения изоляции проводов при укладке. При значениях $k_п < 0{,}65$ в связи с повышением плотности тока в пазу увеличивается температура обмотки. Это может привести к необходимости удлинения сердечников статора и ротора. Кроме того, для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщенные клинья.

Из (6.37) диаметр элементарного изолированного провода (мм)

$$d' = [k_п S''_{п1} / (N_{п1} c)]^{1/2}. \tag{6.39}$$

По Приложению 1 находим ближайший стандартизованный диаметр d', соответствующий ему диаметр неизолированного провода d и площадь поперечного сечения S. После этого уточняют коэффициент заполнения паза по (6.37) и ширину шлица (мм)

$$b_{ш1}'' = d' + 2b_и + 0{,}4. \tag{6.40}$$

Если окажется, что $b_{ш1}' > b_{ш1}''$, то принимают $b_{ш1} = b_{ш1}'$, если $b_{ш1}' < b_{ш1}''$, то принимают $b_{ш1} = b_{ш1}''$.

Плотность тока в обмотке статора (А/мм^2)

$$J_1 = I_1 / (c S a_1). \tag{6.41}$$

Уровень удельной тепловой нагрузки статора от потерь в обмотке в значительной мере определяет ожидаемое превышение тем-

пературы обмотки; как показано в § 4.4, этот уровень характеризуется произведением линейной нагрузки на плотность тока в обмотке A_1J_1.

У проектируемой обмотки статора находят указанное произведение и сравнивают его со средним допускаемым значением из рис. 6.9, соответствующим исполнению с изоляцией класса нагревостойкости F и с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. При изоляции классов нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рисунка значение $(A_1J_1)_{доп}$ умножают на коэффициент 0,75 (для класса В) или на 1,3 (для класса Н) и на коэффициент k_5 (табл. 6.15), учитывающий изменение эффекта охлаждения обмотки и влияния его на $(A_1J_1)_{доп}$ при различных частотах вращения. Если полученный при расчете двигателя показатель A_1J_1 превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует либо повысить площади поперечных сечений провода и паза $S''_{п1}$, для чего необходимо уменьшить размеры $h_{с1}$ и $b_{з1}$, с учетом того, чтобы $B_{с1}$ и $B_{з1}$ не превышали допускаемых значений, либо удлинить сердечники статора и ротора. При этом увеличится магнитный поток Φ и уменьшится количество проводников в пазу.

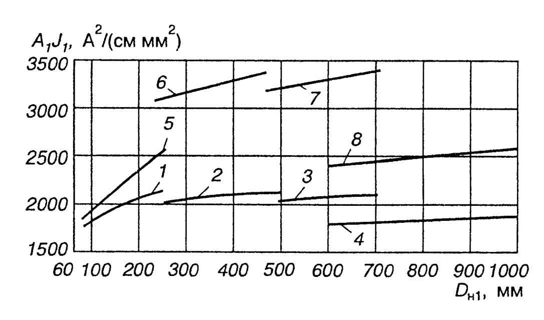


Рис. 6.9. Средние допустимые значения $A_1J_1 = f(D_{н1})$ при классе нагревостойкости F и $2p=4$: *1* — исполнение по защите — IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *2* — то же, что *1*, но двухслойная обмотка; *3* — IP44, IC0141, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; *4* — IP44: IC0161, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка; *5* — IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; *6* — то же, что *5*, но двухслойная обмотка; *7* — IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; *8* — IP23, IC01, открытые пазы, $U=6000$ В, двухслойная обмотка

Таблица 6.15

Степень защиты	$D_{н1}$, мм	Коэффициент k_5 для различных значений $2p$				
		2	4	6	8	10 и 12
IP44	80 — 240	0,78	1,0	1,0	1,0	—
	280 — 500	1,0	1,0	1,0	1,0	—
	520 — 660	1,0	1,0	0,87	0,87	0,84
	740 — 990	—	1,0	0,89	0,83	0,77
IP23	280 — 500	1,07	1,0	0,89	0,84	—
	520 — 660	1,0	1,0	0,86	0,75	0,66
	740 — 990	—	1,0	0,89	0,83	0,79

Размеры (мм) элементов обмотки определяют в следующей последовательности:

Среднее зубцовое деление статора	$t_{ср1}=\pi(D_1+h_{п1})/z_1$	(6.42)
Средняя ширина катушки обмотки статора	$b_{ср1}=t_{ср}y_{п1}$	(6.43)
Средняя длина одной лобовой части катушки	$l_{л1}=(1{,}16+0{,}14p)b_{ср1}+15$	(6.44)
Средняя длина витка обмотки	$l_{ср}=2(l_1+l_{л1})$	(6.45)
Длина вылета лобовой части обмотки (мм): при $h\leqslant 132$ мм	$l_{в1}=(0{,}19+0{,}1p)b_{ср1}+10$	(6.46)
при $h\geqslant 160$ мм	$l_{в1}=(0{,}12+0{,}15p)b_{ср1}+10$	(6.47)

Конструкция изоляции обмотки статора из круглых проводников, расположенных в трапецеидальных полузакрытых пазах, приведена в Приложениях 19 и 21.

Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами. Достоинством прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов статора (рис. 6.10) является возможность размещения в них проводов прямоугольного поперечного сечения, что повышает коэффициент заполнения пазов медью, а также надежность обмотки.

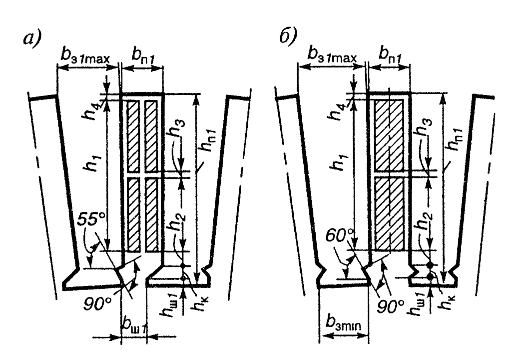


Рис. 6.10. Прямоугольные пазы статора: полуоткрытые (*а*) и открытые (*б*)

Для определения предварительной ширины зубца в наиболее узком месте $b_{з1min}'$ следует принять предварительное значение магнитной индукции в этой части зубца $B_{з1max}'$ по табл. 6.16.

Таблица 6.16

Форма пазов	$2p$	$B_{з1max}'$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
Полуоткрытые	2 4 — 12	1,75 — 1,95 1,6 — 1,8	1,9 — 2,1 1,7 — 1,9
Открытые	2 4 — 12	1,7 — 1,9 1,6 — 1,8	1,8 — 2,0 1,7 — 1,9

Примечание. Уточненные при дальнейших расчетах значения $B_{з1max}$ не должны превышать указанные в таблице более чем на 10%

Рекомендуется применять следующие марки проводов прямоугольного сечения: для класса В — ПЭТВП (при $U \leqslant 660$ В) и ПЭТВСД (при $U=6000$ В); для класса F — ПЭТП-155; для класса Н — ПЭТП-200.

Выбор размеров прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов и расположенных в них проводов производят в такой последовательности.

Предварительное значение магнитной индукции в наиболее узком месте зубца статора (Тл)	$B_{з1max}$ по табл. 6.16	
Зубцовое деление статора в наиболее узком месте (мм) (для полуоткрытых пазов)	$t_{1min}=$ $=\pi(D_1+2h_{ш1}+2h_к)/z_1$	(6.48)
Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з1min}=$ $=t_{1min}B_\delta/(k_c B'_{з1max})$	(6.49)
Предварительная ширина полуоткрытого и открытого паза в штампе (мм)	$b'_{п1}=t_{1min}-b'_{з1min}$	(6.50)
Ширина шлица полуоткрытого паза (мм)	$b_{ш1}\approx 0{,}6b'_{п1}$	(6.51)
Количество эффективных проводников по ширине паза	При полуоткрытых пазах и $N_{п1}$ четном $N_ш=2$. При $N_{п1}$ нечетном $N_ш=1$; при этом количество элементарных проводников $c \geqslant 2$ и четное. При открытых пазах $N_ш=1$; 2	
Допустимая ширина эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$b'_{эф}=(b'_{п1}-2b_{и1}-b_c)/N_ш$	(6.52)
Количество эффективных проводников по высоте паза	$N_в=N_{п1}/N_ш$	(6.53)
Предварительная высота спинки статора (мм)	h'_{c1} — по (6.24)	
Предварительная высота паза (мм)	$h_{п1}$ — по (6.25)	
Допустимая высота эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$h'_{эф}=(h_{п1}-h_{и1}-h_к-$ $-h_{ш1}-h_c)/N_в$	(6.54)
Площадь эффективного проводника (мм^2)	$S'_{эф}=h'_{эф}b'_{эф}$	(6.55)

Здесь $h_{и1}$, $2b_{и1}$ — общая толщина изоляции по высоте и ширине паза (табл. 6.17); h_c, b_c — припуски на сборку сердечника по высоте и ширине: для $h \leqslant 355$ мм h_c и $b_c=0{,}3$, а для $h \geqslant 400$ мм — h_c и $b_c=0{,}35$; высота шлица $h_{ш1}=1{,}0$ мм, высота клина $h_к=$ $=3{,}0$ — $3{,}5$ мм.

Таблица 6.17

h, мм	Форма паза	$h_{и1}$, мм	$2b_{и1}$, мм
280 — 355	Полуоткрытые	4,5	2,2
280 — 355	Открытые	4,5	1,8
400 — 450	»	12,4	4,1

Примечание. Значения $h_{и1}$ и $2b_{и1}$ учитывают технологические зазоры на укладку обмотки и толщину всех изоляционных прокладок, но не учитывают толщину витковой изоляции и высоту клина; $b_{и1}$ – односторонняя толщина корпусной изоляции, $2b_{и1}$ — двусторонняя.

Для определения количества элементарных проводов в одном эффективном можно исходить из наибольшей допустимой по технологическим соображениям площади и ширины элементарного проводника. Для полуоткрытых пазов: площадь элементарного провода $S_{доп} \leqslant 10$ мм^2, ширина $b_{доп} \leqslant 4{,}7$ мм; для открытых пазов — $S_{доп} \leqslant 18$ мм^2, $b_{доп} \leqslant 7{,}4$ мм.

Для уменьшения добавочных потерь от вихревых токов, наводимых потоком рассеяния, прямоугольные проводники располагают в пазу статора плашмя, т. е. большей стороной по ширине паза. При этом высота эффективного проводника $a^*_{эф}$ ограничена (для низковольтных машин $a_{эф} \leqslant 2{,}12$ мм, для высоковольтных $a_{эф} \leqslant 2{,}5$). Если высота (меньшая сторона эффективного проводника) получается больше указанной, то эффективный проводник по высоте также подразделяют на элементарные. Предварительно количество элементарных проводников определяют делением $S_{эф}$ на $S_{доп}$ с округлением до ближайшего большего целого числа c'.

Количество элементарных проводников в одном эффективном по ширине определяют делением полученной ширины эффективного проводника $b'_{эф}$ на $b_{доп}$ с округлением до ближайшего большего целого числа c_b. Разделив c' на c_b, получим предварительно количество элементарных проводников в одном эффективном по высоте паза c'_a. Разделив $a'_{эф}$ на c'_a, определяют размер элементарного проводника по высоте паза. Если он превысит 2,12 мм (для низковольтных машин) или 2,5 мм (для высоковольтных), то количество элементарных проводников по высоте паза следует увеличить. Получают окончательное количество элементарных проводников по высоте паза c_a и общее их количество $c = c_a c_b$.

Меньший a' и больший b' размеры неизолированного элементарного провода

$$a' = (a'_{эф}/c_a) - \Delta_и, \tag{6.56}$$

$$b' = (b'_{эф}/c_b) - \Delta_и, \tag{6.57}$$

где $\Delta_и$ — двусторонняя толщина изоляции провода, мм (см. Приложение 3).

По Приложению 2 находят ближайший стандартизованный элементарный неизолированный провод с размерами a и b, близкими к вычисленным по (6.56) и (6.57), и площадь его поперечного сечения S.

*Здесь и далее для прямоугольных проводников принимаются в соответствии с ГОСТ 434 — 78 на обмоточные провода обозначения меньшего размера «a» и большего «b».

Размер по высоте паза в штампе (мм)

$$h_{п1} = N_b c_a (a + \Delta_и) + h_{и1} + h_с + h_{ш1} + h_к. \tag{6.58}$$

Размер по ширине паза в штампе (мм)

$$b_{п1} = N_ш c_b (b + \Delta_и) + 2b_{и1} + b_с. \tag{6.59}$$

Уточненная ширина зубца в наиболее узкой части (мм)

$$b_{з1min} = t_{1min} - b_{п1}. \tag{6.60}$$

Уточненная магнитная индукция в наиболее узкой части зубца статора (Тл)

$$B_{з1max} = t_1 B_\delta / (b_{з1min} k_с). \tag{6.61}$$

Плотность тока в обмотке статора J_1 определяют по (6.41), а $h_{с1}$ — по (6.26). Далее находят удельную тепловую нагрузку от потерь в обмотке $A_1 J_1$, сравнивают ее со средним допускаемым значением по рис. 6.9. При классах нагревостойкости В и Н, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рис. 6.9 значение $(A_1 J_1)_{доп}$ должно быть умножено на поправочные коэффициенты, как это было рекомендовано для трапецеидальных пазов. Если полученный при расчете двигателя показатель $A_1 J_1$ превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует поступить так, как было рекомендовано для трапецеидальных пазов. Размеры обмотки определяют в следующей последовательности:

Среднее зубцовое деление статора (мм)	$t_{ср1}$ — по (6.42)	
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{ср1}$ — по (6.43)	
Средняя длина одной лобовой части обмотки (мм): при $U \leqslant 660$ В при $U = 6000$ В	$l_{л1} = 1{,}3 b_{ср1} + h_{п1} + 50$ $l_{л1} = 1{,}2 b_{ср1} + h_{п1} + 90$	(6.62) (6.63)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср1}$ — по (6.45)	
Длина вылета лобовой части обмотки (мм) при $U \leqslant 660$ В	$l_{в1} = 0{,}4 b_{ср1} + h_{п1}/2 + 25$	(6.64)
То же, при $U = 6000$ В	$l_{в1} = 0{,}35 b_{ср1} + h_{п1}/2 + 45$	(6.65)

Конструкция изоляции обмотки статора из прямоугольного провода, расположенного в полуоткрытых или в открытых пазах, приведена в Приложениях 19 и 21.

6.4. Обмотка короткозамкнутого ротора

Обмотка ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами. Пазы ротора имеют обычно овальную форму (рис. 6.1, *а*, *б*), причем радиусы r_1 и r_2 принимают такими, чтобы стенки зубцов были параллельны ($b_{з2}$=const) на протяжении расстояния h_1. Такие пазы применяют в двигателях с $h \leqslant 250$ мм. В двигателях с $h \leqslant 132$ мм пазы обычно выполняют полузакрытыми, а с $h \geqslant 160$ мм — закрытыми.

Примерные значения высот пазов короткозамкнутого ротора $h_{п2}$ приведены на рис. 6.13. Чем больше принимаемое значение $h_{п2}$, тем меньше высота спинки ротора $h_{с2}$ и соответственно больше магнитная индукция в спинке $B_{с2}$. Если при проверке расчетом значение $B_{с2}$ превысит предел, равный 1,6 Тл, то высоту паза $h_{п2}$, принятую из рисунка, снижают. Расчет размеров зубцовой зоны (зубцов и пазов) ротора начинают с определения ширины зубца $b_{з2}$, исходя из средних значений магнитной индукции в зубцах ротора $B_{з2}$ (табл. 6.18).

Таблица 6.18

h, мм	$2p$	$B_{з2}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
50 — 132	2; 4; 6; 8	1,60 — 1,80	1,85 — 2,05
160 — 250	2 4; 6; 8	1,75 — 1,95 1,70 — 1,90	1,85 — 2,05 1,75 — 1,95
280 — 355	2 4 6; 8; 10; 12	1,60 — 1,80 1,80 — 2,00 1,70 — 1,90	1,80 — 2,00 2,00 — 2,20 1,80 — 2,00

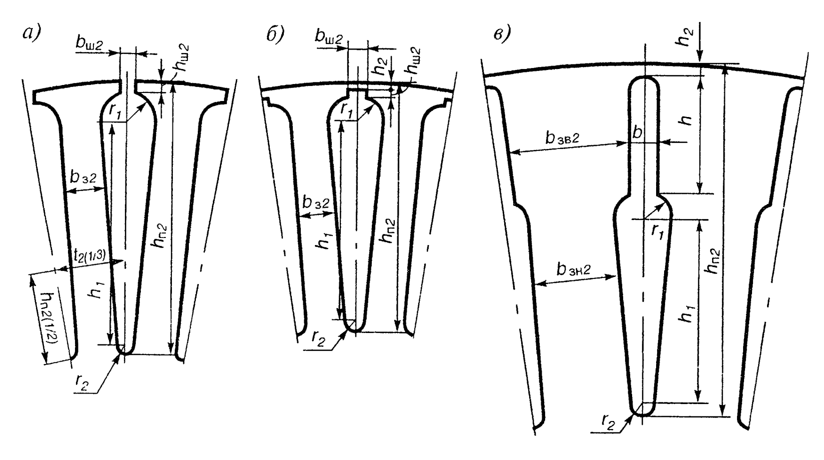


Рис. 6.11. Пазы короткозамкнутого ротора: *а* — овальные полузакрытые; *б* — овальные закрытые; *в* — бутылочной формы

Определяют радиусы пазов r_1 и r_2, обеспечивающие постоянство $b_{з2}$. Если окажется, что $r_2<1$ (для $h \leqslant 132$ мм) или $r_2<2$ (для $h \geqslant 160$ мм), то следует уменьшить $b_{з2}$, повысив $b_{з2}$.

Определение размеров овальных полузакрытых и закрытых пазов производят в следующей последовательности:

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — из рис. 6.13	
Расчетная высота спинки ротора (мм):		
$h \leqslant 63$ мм, $2p=2$	$h_{с2}=0{,}49D_{н2}-h_{п2}$	(6.66)
$h \leqslant 63$ мм, $2p \geqslant 4$	$h_{с2}=0{,}4D_{н2}-h_{п2}$	(6.67)
$h \geqslant 71$ мм, $2p=2$	$h_{с2}=0{,}58D_{н2}-h_{п2}-2d_{к2}/3$	(6.68)
$h \geqslant 71$ мм, $2p \geqslant 4$	$h_{с2}=0{,}38D_{н2}-h_{п2}-2d_{к2}/3$	(6.69)
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{с2}=\Phi \cdot 10^6/(2k_с \cdot l_2 \cdot h_{с2})$	(6.70)
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2=\pi D_{н2}/z_2$	(6.71)
Магнитная индукция в зубцах ротора (Тл)	$B_{з2}$ — по табл. 6.18	
Ширина зубца (мм)	$b_{з2}=t_2 B_\delta/(B_{з2}k_с)$	(6.72)
Меньший радиус паза (мм)	$r_2=(\pi(D_{н2}-2h_{п2})-$ $-z_2 b_{з2})/(2(z_2-\pi))$	(6.73)
Больший радиус паза (мм)	$r_1=(\pi(D_{н2}-h_{ш2}-2h_2)-$ $-z_2 b_{з2})/(2(z_2+\pi))$	(6.74)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1=h_{п2}-h_{ш2}-h_2-r_1-r_2$	(6.75)
Проверка правильности определения r_1 и r_2, исходя из условия $b_{з2}=\text{const}$	$\pi h_1-z_2(r_1-r_2)\approx 0$	(6.76)
Площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе (мм²)	$S_{ст}=S_{п2}=0{,}5\pi(r_1^2+r_2^2)+$ $+(r_1+r_2)h_1$	(6.77)

Здесь для полузакрытого паза $h_{ш2}=0{,}5$ — $0{,}75$ мм; $h_2=0$; $b_{ш2}=1{,}0$ — $1{,}5$ мм; для закрытого паза $h_{ш2}=0{,}7$ мм; $h_2=0{,}3$ мм; $b_{ш2}=1{,}5$ мм. При отсутствии аксиальных каналов в роторе $d_{к2}=0$.

Пазы ротора бутылочной формы. Пазы короткозамкнутого ротора двигателей с $h=280$ — 355 мм обычно имеют бутылочную форму и выполняются закрытыми (рис. 6.11, *в*). Размеры нижней части бутылочного паза выбирают так, чтобы обеспечить равновеликое поперечное сечение зубцов $b_{з\,н2}$ на протяжении h_1.

Ход расчета аналогичен описанному для ротора с овальными пазами. По рис. 6.13 выбирают примерное значение высоты паза ротора $h_{п2}$. Этим определяется расчетная высота спинки ротора

h_{c2} и магнитная индукция в спинке ротора B_{c2}, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят ширину зубца в его нижней части $b_{з.н2}$, исходя из того, чтобы магнитная индукция в нижней части зубцов ротора $B_{з.н2}$ не превосходила бы значений, приведенных в табл. 6.18.

Для верхней части паза принимают $h_2 = 0,2$ — 0,5 мм; $h = 15$ мм; затем рассчитывают размеры нижней части паза: больший r_1 и меньший r_2 радиусы; расстояние между их центрами, а также ширину верхней части стержня b. Значение r_2 должно быть не менее 2 мм, иначе следует уменьшить $b_{з.н2}$, повысив $B_{з.н2}$.

Определение размеров пазов ротора бутылочной формы производят в следующей последовательности:

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — из рис. 6.13	
Расчетная высота спинки ротора (мм)	h_{c2} — по (6.68) — (6.69)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B_{c2} — по (6.70)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (6.71)	
Ширина зубца в нижней части зубца (мм)	$b_{з.н2}$ — по (6.72)	
Меньший радиус паза (мм)	$r_2 = (\pi(D_{н2} - 2h_{п2}) - - z_2 b_{з.н2})/(2z_2 - \pi)$	(6.78)
Больший радиус паза (мм)	$r_1 = (\pi(D_{н2} - 2h_2 - 2h) - - z_2 b_{з.н2})/(2(z_2 + \pi))$	(6.79)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1 = h_{п2} - h_2 - h - r_1 - r_2$	(6.80)
Правильность определения r_1 и r_2, исходя из требования $b_{з.н2} = \mathrm{const}$	по (6.76)	
Ширина верхней части стержня	$b \approx (1 \div 1,25) r_1$	(6.81)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня (мм^2)	$S_{ст.н} = 0,5\pi(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1$	(6.82)
Площадь поперечного сечения верхней части стержня (мм^2)	$S_{ст.в} = b(h - 0,11b)$	(6.83)
Общая площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе	$S_{ст} = S_{п2} = S_{ст.н} + S_{ст\ в}$	(6.84)

Открытые пазы ротора прямоугольной формы. Открытые прямоугольные пазы в роторе (рис. 6.12) применяются для высоковольтных двигателей с $h = 400$ — 450 мм. В эти пазы укладывают прямо-

угольные алюминиевые шины, привариваемые к алюминиевым короткозамыкающим кольцам.

Ход расчета аналогичен описанному для ротора с овальными пазами. По рис. 6.13 выбирают предварительно значение высоты паза ротора $h'_{п2}$, что предопределяет предварительное значение высоты спинки ротора h'_{c2} и магнитную индукцию в спинке ротора, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят ширину зубца в наиболее узком месте, исходя из того, чтобы магнитная индукция в этой части зубцов была: для исполнения IP44 — $B'_{з2\max}=1{,}5$ — 1,7 Тл; для IP23 — $B'_{з2\max}=1{,}6$ — 1,8 Тл. Затем выбирают ближайшие стандартные размеры прямоугольного алюминиевого стержня (см. Приложение 4) и по ним уточняют размеры паза, зубца, спинки (округленные до десятых долей мм в большую сторону) и магнитную индукцию.

Размеры открытых пазов ротора прямоугольной формы определяют в следующей последовательности.

Предварительные размеры		
Высота паза (мм)	$h'_{п2}$ — из рис. 6.13	
Высота спинки ротора (мм)	h'_{c2} — по (6.68) или по (6.69)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B'_{c2} — по (6.70)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (6.71)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з2\min}=t_2B_\delta/(B'_{з2\max}k_c)$	(6.85)
Ширина паза (мм)	$b'_{п2}=[\pi(D_{н2}-2h'_{п2})/z_2]-b'_{з2\min}$	(6.86)
Размеры стержня по высоте (мм)	$h'_{ст}=h'_{п2}-h_c-h_{ш2}$	(6.87)
То же, по ширине	$b'_{ст}=b'_{п2}-b_c$	(6.88)
Уточненные размеры		
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм^2)	$h_{ст}$, $b_{ст}$ и $S_{ст}$ — по Приложению 4	
Высота паза (мм)	$h_{п2}=h_{ст}+h_c+h_{ш2}$	(6.89)
Ширина паза (мм)	$b_{п2}=b_{ст}+b_c$	(6.90)
Площадь поперечного сечения паза (мм^2)	$S_{п2}=h_{п2}b_{п2}$	(6.91)
Высота спинки ротора (мм)	h_{c2} — по (6.68) или по (6.69)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B_{c2} — по (6.70)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з2\min}=[\pi(D_{н2}-2h_{п2})/z_2]-b_{п2}$	(6.92)
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B_{з2\max}=t_2B_\delta/(b_{з2\min}k_c)$	(6.93)
Длина стержня (мм)	$l_{ст}=l_2+2l_{л2}$	(6.94)

Здесь h_c и b_c — припуски на сборку сердечника (см. § 6.3); $h_c=4$ мм.

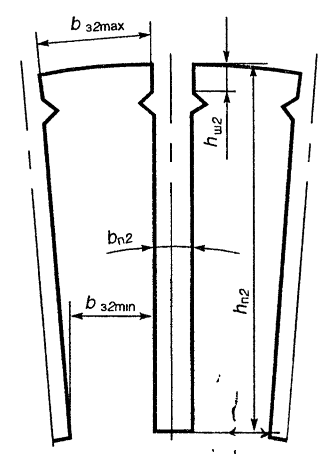


Рис. 6.12. Пазы короткозамкнутого ротора прямоугольной формы

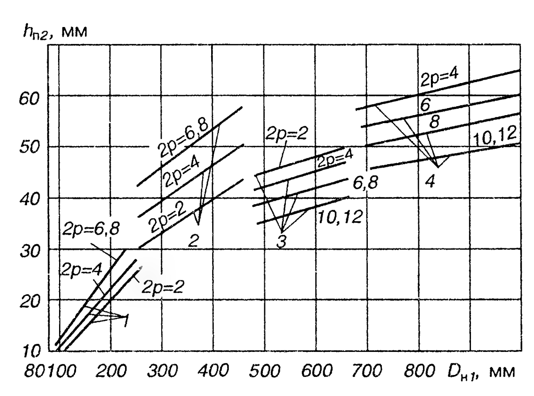


Рис. 6.13. Средние значения $h_{п2}=f(D_{н1})$ короткозамкнутого ротора: *1* — ротор с овальными полузакрытыми пазами; *2* — ротор с овальными закрытыми пазами; *3* — ротор с бутылочными пазами; *4* — ротор с прямоугольными открытыми пазами

Короткозамыкающее кольцо обмотки ротора. На рис. 6.14 показаны короткозамыкающие кольца для литой (*а*) и сварной (*б*) конструкций клетки. Размеры кольца определяют следующим образом. Поперечное сечение кольца $S_{кл}$ связано с ранее определенным сечением стержня клетки $S_{ст}$, а высота кольца $h_{кл}$ — с высотой паза $h_{п2}$. Это предопределяет длину кольца $l_{кл}$. Для определения расположения кольца клетки вычисляют его средний диаметр $D_{кл.ср}$.

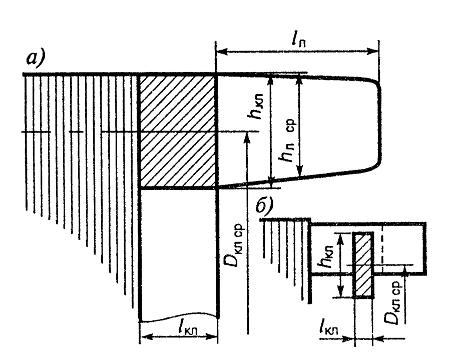


Рис. 6.14. Короткозамыкающие кольца ротора

Размеры короткозамыкающего кольца находят в следующей последовательности:

Поперечное сечение кольца (мм²): литой клетки сварной клетки	$S_{кл}=(0,35\div0,45)z_2S_{ст}/(2p)$ $S_{кл}=0,4z_2S_{ст}/(2p)$	(6.95) (6.96)
Высота кольца (мм): литой клетки сварной клетки	$h_{кл}\approx(1,1 - 1,2)h_{п2}$ $h_{кл}\approx 1,2h_{п2}$	(6.97) (6.98)

Длина кольца (мм)	$l_{кл}=S_{кл}/h_{кл}$	(6.99)
Средний диаметр кольца (мм): литой клетки сварной клетки	$D_{кл.ср}=D_{н2}-h_{кл}$ $D_{кл.ср}=D_{н2}-2h_{ш2}-2h_{кл}-0,5h_{ст}$	(6.100) (6.101)
Вылет лобовой части обмотки (мм)	$l_{в2}=k_{л}l_{л2}+l_{кл}$	(6.102)

Здесь $l_{л2}=50$ мм — длина лобовой части стержня; $k_{л}=0{,}9$ — коэффициент, учитывающий изгиб стержня.

6.5. Обмотка фазного ротора

Тип обмотки и общие положения. Обычно в роторах применяют двухслойную волновую обмотку из медных изолированных стержней прямоугольного поперечного сечения. В пазу располагают по два стержня (один над другим, большей стороной по высоте паза). Следовательно, количество проводников в пазу $N_{п2}=2$. Если по расчету сечение эффективного стержня получается больше 100 мм^2, то его разделяют на два элементарных; тогда по ширине паза располагают два стержня, изолированных вместе. Основные свойства двухслойных волновых обмоток ротора и методы выполнения их подробно освещены в [4; 13]. На рис. 6.15 приведена для примера развернутая схема двухслойной волновой обмотки фазного ротора. Количество пазов ротора z_2 должно выбираться с учетом рекомендаций, приведенных в § 6.2, и, в частности, табл. 6.12. Количество пазов на полюс и фазу ротора q_2 определяется по (6.10). Обмотка имеет одну параллельную ветвь $a_2=1$. Количество последовательно соединенных витков обмотки одной фазы

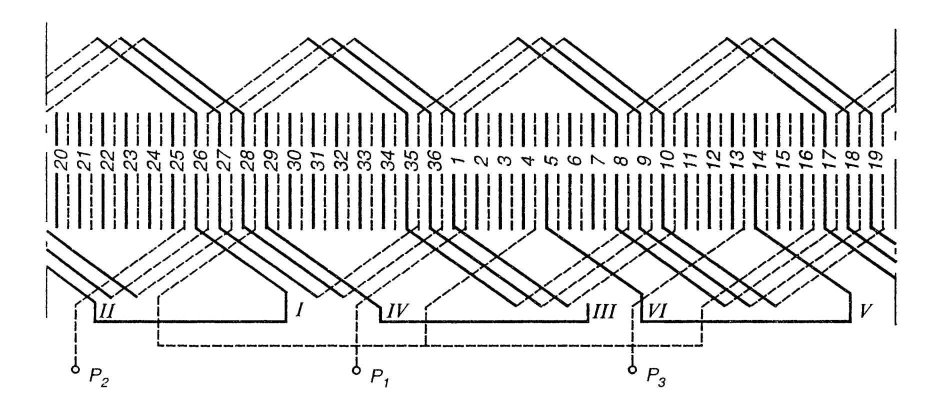


Рис. 6.15. Схема двухслойной волновой обмотки фазного ротора (одной фазы): $Z_2=36$; $2p=4$; $q_2=3$; $a=1$

$$\omega_2 = 2pq_2. \qquad (6.103)$$

Шаги обмотки для целого и дробного q_2 находят следующим образом. При целом q_2 шаги секций с передней (со стороны выводов) и с задней стороны $y_{п2}$ и $y'_{п2}$ принимаются равными $3q_2$, а шаг в конце обхода ротора укороченный: $y''_{п2}=3q_2-1$. При дробном q_2 шаг обмотки с передней стороны $y_{п2}=3q_2-1/2$, с задней $y'_{п2}=3q_2+1/2$, а шаг в конце обхода $y''_{п2}=3q_2-1/2$. Обмотка с дробным q_2 считается обмоткой с укороченным шагом; при этом ($\beta_2 \approx 0{,}96$). Коэффициенты распределения $k_{р2}$, укорочения $k_{у2}$ и обмоточный коэффициент $k_{об2}$ определяются так же, как для обмотки статора по (6.11), (6.14), (6.15) с заменой q_1 на q_2, z_1 на z_2, β_1 на β_2.

Таблица 6.19

$2p$	$B'_{з2max}$ (тл) для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
4	1,8 — 2,2	1,9 — 2,35
6 — 12	1,7 — 2,1	1,7 — 2,1

Примечание. См. примечание к табл. 6.16.

Таблица 6.20

$2p$	$h'_{п2}$, мм	$2p$	$h'_{п2}$, мм
4	$33{,}5+0{,}024D_{н1}$	8	$29+0{,}024D_{н1}$
6	$31{,}4+0{,}024D_{н1}$	10 и 12	$25{,}8+$ $+0{,}024D_{н1}$

Коэффициент трансформации ЭДС и тока

$$k_{тр} = \omega_1 k_{об1}/(\omega_2 k_{об1}). \qquad (6.104)$$

Электродвижущая сила обмотки (В)

$$E_2 = k_{н} U_1 / k_{тр}. \qquad (6.105)$$

При соединении обмотки ротора в звезду напряжение на кольцах (В)

$$U_{х} \approx (3)^{1/2} E_2. \qquad (6.106)$$

Для уменьшения тока, проходящего через кольца, и соответственно потерь в щеточном контакте рекомендуется выбирать отношение напряжения к току кольца $U_{х}/I_{х}=0{,}6$ — 2,5 (большие значения для больших двигателей), но $U_{х}$ должно быть не больше 1200 В.

На контактных кольцах асинхронного двигателя с фазным ротором устанавливаются металлографитные щетки марки МГ4.

Обмотка фазного ротора с прямоугольными полузакрытыми пазами. Прямоугольные полузакрытые пазы фазного ротора имеют форму, показанную на рис. 6.16. Они применяются в электродвигателях с $h \geqslant 225$ мм. Для нахождения ширины зубца в наиболее узком

месте $b_{з2min}$ следует принять значение индукции в этой части зубца $B'_{з2max}$ по табл. 6.19 и определить предварительное значение $b'_{з2min}$ по (6.85). Предварительное значение высоты паза ротора $h'_{п2}$ берут из табл. 6.20.

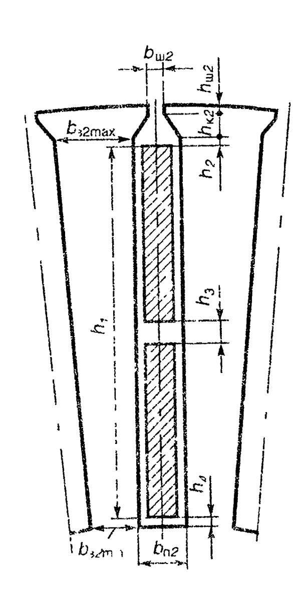


Рис. 6.16. Пазы фазного ротора прямоугольные полузакрытые

Этим определяется предварительное значение высоты спинки ротора h'_{c2} и магнитная индукция в спинке ротора B_{c2}, которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят предварительную ширину паза и допустимые высоту и ширину стержня обмотки ротора. Определяют ближайшие стандартные размеры стержня и его сечение. Потом устанавливают окончательные размеры зубцовой зоны, высоту спинки ротора, индукции и размеры катушки обмотки.

Ниже приведены (для классов нагревостойкости B, F и H) значения общей толщины изоляции в пазу ротора по высоте и ширине $h_{и2}$ и $2b_{и2}$, включающие толщину изоляции стержня, размеры прокладок и припусков на укладку:

Высота оси вращения h, мм	225 — 250	280 - 355	400 — 450
Высота $h_{и2}$, мм	4,3	4,5	7,1
Ширина $2b_{и2}$, мм	1,4	1,6	3,0

Значение $h_{и2}$ не учитывает высоту клина $h_{к2}$. Размеры следует принимать такими: для клина — $h_{к2}=2$ мм (при $h \leqslant 250$ мм); $h_{к2}=$ $=2,5$ мм (при $h=280$ — 355 мм); $h_{к2}=3,5$ мм (при $h>355$ мм); для шлица — $h_{ш2}=1,0$ мм; $b_{ш2}=1,5$ мм. Конструкция изоляции обмоток фазного ротора представлена в Приложении 17. Размеры прямоугольных полузакрытых пазов ротора и расположенных в них проводов рассчитывают в следующей последовательности:

Предварительные значения		
Высота паза (мм)	$h_{п2}$ — по табл. 6.20	
Высота спинки ротора (мм)	h_{c2} — по (6.99)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	B'_{c2} — по (6.70)	

Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	t_2 — по (6.71)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца ротора (Тл)	$B'_{з2max}$ — по табл. 6.19	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з2min}$ — по (6.85)	
Ширина паза (мм)	$b'_{п2}$ — (по 6.86)	
Размеры стержня по высоте (мм)	$h'=(h'_{п2}-h_{и2}-h_{к2}-$ $-h_{ш2}-h_{с})/2$	(6.107)
То же, по ширине (мм)	$b'=b'_{п2}-b_{и2}-b_{с}$	(6.108)
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм^2)	$h_{ст}$, $b_{ст}$, $S_{ст}$ — по Приложению 2	
Количество элементарных стержней в одном эффективном	Обычно $c_2=1$; при $S_{ст}\geqslant 100$ мм^2 можно принять $c_2=2$, 3 и 4	
Уточненные значения		
Высота паза (мм)	$h_{п2}=2h_{ст}+h_{и2}+h_{к2}+$ $+h_{ш2}+h_{с}$	(6.109)
Ширина паза (мм)	$b_{п2}=b_{ст}+2b_{и2}+b_{с}$	(6.110)
Высота спинки ротора (мм)	$h_{с2}$ — по (6.69)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{с2}$ — по (6.70)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{з2min}$ — по (6.92)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B_{з2max}$ — по (6.93)	
Среднее зубцовое деление ротора (мм)	$t_{ср2}=\pi(D_{н2}-h_{п2})/z_2$	(6.111)
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{ср2}=t_{ср2}y_{п.ср2}$	(6.112)
Средняя длина лобовой части катушки обмотки (мм): при $U_{к}\leqslant 750$ В при $U_{к}>750$ В	 $l_{л2}=1{,}2b_{ср2}+h_{п2}+50$ $l_{л2}=1{,}2b_{ср2}+h_{п2}+70$	 (6.113) (6.114)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{ср2}=2(l_2+l_{л2})$	(6.115)
Вылет лобовой части обмотки (мм): при $U_{к}\leqslant 750$ В при $U_{к}>750$ В	 $l_{л2}=0{,}3b_{ср2}+(h_{п2}/2)+25$ $l_{в2}=0{,}3b_{ср2}+(h_{п2}/2)+35$	 (6.116) (6.117)

Здесь $y_{п\,ср2}$ — средний шаг секции по пазам, равный полусумме шагов с передней и с задней стороны, $h_с$ и $b_с=0{,}3$ для $h\leqslant 355$ мм, а $h_с$ и $b_с=0{,}35$ мм для $h\geqslant 400$ мм.

6.6. Расчет магнитной цепи

Основные положения. В электрических машинах с симметричной магнитной цепью, а к таким машинам относятся асинхронные двигатели, можно ограничиться расчетом МДС на полюс.

Магнитная цепь асинхронного двигателя состоит из следующих пяти однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор между ротором и статором, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора, спинка ротора. При расчете магнитного напряжения каждого участка принимают, что магнитная индукция на участке распределена равномерно.

Расчет магнитной цепи электродвигателя производят в такой последовательности: для каждого участка определяют его площадь поперечного сечения, магнитную индукцию, напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка, суммарную МДС.

Расчет суммарной МДС у асинхронных двигателей проводят только для номинального режима работы. Расчет магнитной цепи ведут по основной волне магнитного поля; в соответствии с этим магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ является в расчете амплитудой основной волны.

Насыщение магнитной цепи вызывает уплощение кривой поля; соответственно при повышенной индукции магнитное сопротивление зубцов по середине полюсного деления больше, чем по краям. Учет уплощения производят в соответствии с [22] и [25]. Для облегчения расчета в Приложениях 8 — 10 приведены таблицы намагничивания $H=f(B)$ для зубцов статора и ротора, вычисленные с учетом уплощения поля; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения участка зубцов. При расчете магнитной цепи условно принимают среднюю длину пути магнитного потока в спинке статора или ротора; в действительности длина этих путей различна — максимальная по краям полюсного деления и минимальная посередине. Соответственно неравномерно распределяется индукция.

Для упрощения расчета в Приложениях 11 — 13 приведены таблицы намагничивания $H=f(B)$ для спинки статора и ротора, вычисленные с учетом синусоидального распределения индукции вдоль силовой линии; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения спинки статора и ротора.

Основное сопротивление магнитной цепи асинхронного двигателя сосредоточено в воздушном зазоре между ротором и статором. Это сопротивление увеличивается дополнительно из-за зубчатого строения статора и ротора; увеличение его учитывается соответствующим поправочным коэффициентом (больше единицы). При наличии радиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора или ротора часть магнитного потока проходит

через каналы, снижая магнитное сопротивление воздушного зазора; это уменьшение учитывается коэффициентом (меньше единицы).

При магнитной индукции в зубцах статора или ротора $B \leqslant 1{,}8$ Тл принимают, что магнитный поток проходит только через зубцы, а напряженность магнитного поля H определяют соответственно по кривым для зубцов (см. Приложения 8 — 10). При $B > 1{,}8$ Тл часть магнитного потока, проходящая через пазы, снижает действительную магнитную индукцию в зубцах. Это снижение учитывается коэффициентами $k_з$, зависящими от соотношения площадей рассматриваемых поперечных сечений зубца и паза, а для определения H с целью упрощения вычислений пользуются кривыми для зубцов по Приложениям 14 — 16, рассчитанными для разных значений $k_з$*.

У зубцов трапецеидального поперечного сечения (прямоугольные открытые или полуоткрытые пазы, верхняя часть бутылочных пазов ротора) кривая распределения напряженности поля H по высоте зубца близка к параболе. Если $B_{зmax} > 1{,}8$ Тл, то при расчете магнитного напряжения зубцов напряженность поля определяют по индукции в трех расчетных сечениях зубца — минимальном, среднем и максимальном; среднее значение H при этом рассчитывают по формуле Симпсона (6.138). Если $B_{зmax} \leqslant 1{,}8$ Тл, то с достаточной точностью можно определять H по индукции в одном сечении зубца, расположенном на расстоянии 1/3 его высоты (от окружности, соответствующей диаметру D_1).

У зубцов равновеликого поперечного сечения (трапецеидальные пазы статора, овальные закрытые и полузакрытые пазы ротора, нижняя часть бутылочных закрытых пазов ротора) напряженность поля определяют по индукции в сечении 1/3 высоты зубца; при $B_з \leqslant 1{,}8$ Тл по Приложениям 8 — 10, а при $B_з > 1{,}8$ Тл — по Приложениям 14 — 16 с учетом коэффициента $k_з$ ($B_{з1}$ и $B_{з2}$ определены в § 6.3 — 6.5). Магнитную цепь рассчитывают в следующей последовательности.

МДС для воздушного зазора

Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения статора	$k_{\delta 1} = 1 + b_{ш1}/(t_1 - b_{ш1} + 5\delta t_1/b_{ш1})$	(6.118)
То же, с учетом ротора	$k_{\delta 2} = 1 + b_{ш2}/(t_2 - b_{ш2} + 5\delta t_2/b_{ш2})$	(6 119)

*При наличии в сердечниках статора и ротора радиальных вентиляционных каналов значения коэффициента $k_з$, определяемые по приведенным ниже формулам, следует умножить на отношение $l_1/(l_1 - n_{к1} l_{к1})$.

Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора при наличии радиальных каналов на статоре или на роторе	$k_к = 1 - 3\delta/[l_п + 3\delta(1 + l_п/l_к)]$	(6.120)
То же, при совпадающих каналах на статоре и на роторе	$k_к = 1 - 1{,}5\delta/[l_п + 1{,}5\delta(1 + l_п/l_к)]$	(6.121)
Общий коэффициент воздушного зазора	$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_к$	(6.122)
МДС для воздушного зазора (А)	$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^3$	(6.123)

Здесь при открытых пазах в (6.118) и (6.119) вместо $b_{ш1}$ и $b_{ш2}$ следует подставить соответственно $b_{п1}$ и $b_{п2}$. При отсутствии радиальных каналов (на статоре или на роторе) следует принимать $k_к = 1$, $l_п$ — длина пакета.

МДС для зубцов при трапецеидальных полузакрытых пазах статора (рис. 6.8)

При $B_{з1} \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность магнитного поля	$H_{з1}$ (А/см) — из Приложений 8 — 10	
При $B_{з1} > 1{,}8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм): коэффициент зубцов напряженность магнитного поля (А/см)	 $t_{1(1/3)} = \pi(D_1 + (2/3)h_{п1})/z_1$ $k_{з(1/3)} = (t_{1(1/3)}/(b_{з1} k_c)) - 1$ $H_{з1}$ — из Приложений 14 — 16	 (6.124) (6.125)
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з1} = h_{п1}$	(6.126)
МДС для зубцов (А)	$F_{з1} = 0{,}1 H_{з1} L_{з1}$	(6.127)

МДС для зубцов при прямоугольных, открытых и полуоткрытых пазах статора (рис. 6.10)

При $B_{з1max} \leqslant 1{,}8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца ширина зубца (мм) магнитная индукция на 1/3 высоты зубца (Тл)	$t_{1(1/3)}$ (мм) — по (6.124) $b_{з1(1/3)} = t_{1(1/3)} - b_{п1}$ $B_{з1(1/3)} = t_1 B_\delta/(b_{з1(1/3)} k_c)$	 (6.128) (6.129)
Напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{з1}$ (А/см) — из Приложений 8 — 10	
При $B_{з1max} > 1{,}8$ Тл: зубцовое деление статора (мм) по диаметру D_1: в минимальном сечении зубца в максимальном сечении зубца	 t_1 — по (6.24) t_{1min} — по (6.48) $t_{1max} = \pi(D_1 + 2h_п)/z_1$	 (6.130)
Ширина зубца (мм): в наиболее узкой части	 $b_{з1min}$ — по (6.60)	

в наиболее широкой части	$b_{з1max}=t_{1max}-b_{п1}$	(6.131)
в средней части	$b_{з1ср}=(b_{з1min}+b_{з1max})/2$	(6.132)
Магнитная индукция зубца статора (Тл): в наиболее узкой части в наиболее широкой части в средней части	 $B_{з1max}$ — по (6.61) $B_{з1min}=t_1B_\delta/(b_{з1max}k_c)$ $B_{з1ср}=t_1B_\delta/(b_{з1ср}k_c)$	 (6.133) (6.134)
Коэффициент зубцов: в наиболее узкой части в наиболее широкой части* в средней части*	 $k_{з1max}=[t_{1min}/(b_{з1min}k_c)]-1$ $k_{з1min}=[t_{1max}/(b_{з1max}k_c)]-1$ $k_{з1ср}=(k_{з1max}+k_{з1min})/2$	 (6.135) (6.136) (6.137)
Напряженность магнитного поля (А/см): в наиболее узкой части в наиболее широкой части в средней части	$H_{з1max}=f(B_{з1max}, k_{з1max}$ — из Приложений 14 — 16 $H_{з1min}=f(B_{з1min}, k_{з1min}$ — из Приложений 8 — 10 или 14 — 16 $H_{з1ср}=f(B_{з1ср}, k_{з1ср})$ — из Приложений 8—10 или 14—16	
Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з1}=(H_{з1max}+4H_{з1ср}+H_{з1min})/6$	(6.138)
Средняя длина пути (мм) магнитного потока	$L_{з1}$ по (6.126)	
МДС для зубцов (А)	$F_{з1}$ по (6.127)	

МДС для зубцов при овальных полузакрытых и закрытых пазах ротора (рис. 6.11, *а*, *б*)

При $B_{з2}\leqslant 1{,}8$ Тл напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{з2}$ — из Приложений 8 — 10	
При $B_{з2}>1{,}8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм): коэффициент зубцов напряженность магнитного поля (А/см)	$t_{2(1/3)}=\pi(D_{н2}-(4/3)h_{п2})/z_2$ $k_{з2(1/3)}=[t_{2(1/3)}/(b_{з2}k_c)]-1$ $H_{з2}$ — из Приложений 14 — 16	(6.139) (6.140)
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з2}=h_{п2}-0{,}2r_2$	(6.141)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2}=0{,}1H_{з2}L_{з2}$	(6.142)

МДС для зубцов при бутылочных закрытых пазах ротора (рис. 6.11, *в*)

Средняя ширина верхней части зубца (мм)	$b_{з\,в2}=\pi(D_{н2}-2h_2-h)/z_2-b$	(6.143)

Магнитная индукция в среднем сечении верхней части зубца (Тл); обычно — менее 1,8 Тл	$B_{з.в2}=t_2B_\delta/(b_{з.в2}k_с)$	(6.144)
Напряженность магнитного поля в верхней части зубца (А/см)	$H_{з.в2}$ — из Приложений 8 — 10	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з.в2}=h_2+h$	(6.145)
МДС для верхней части зубца (А)	$F_{з.в2}=0{,}1H_{з.в2}L_{з.в2}$	(6.146)
Магнитная индукция в нижней части зубца (Тл)	$B_{з.н2}=t_2B_\delta/(b_{з.н2}k_с)$	(6.147)
При $B_{з.н2}\leqslant 1{,}8$ Тл напряженность поля (А/см) в нижней части зубца	$H_{з.н2}$ — из Приложений 8 — 10	
При $B_{з.н2}>1{,}8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм) коэффициент зубцов напряженность магнитного поля (А/см) в нижней части зубца	$t_{н2(1/3)}=\pi\,[D_{н2}-(4/3)h_{п2}-$ $-(2/3)(h_2+h)]/z_2$ $k_{з.н(1/3)}=[t_{н2(1/3)}/(b_{з.н2}k_с)]-1$ $H_{з.н2}$ — из Приложений 14 — 16	 (6.148) (6.149)
Средняя длина пути магнитного потока в нижней части зубца (мм)	$L_{з.н2}=r_1+h_1+0{,}8r_2$	(6.150)
МДС для нижней части зубца (А)	$F_{з.н2}=0{,}1H_{з.н2}L_{з.н2}$	(6.151)
МДС для зубцов ротора (А)	$F_{з2}=F_{з.в2}+F_{з.н2}$	(6.152)

МДС для зубцов при прямоугольных пазах ротора (рис. 6.12)

При $B_{з2\max}\leqslant 1{,}8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм) ширина зубца на 1/3 высоты (мм) магнитная индукция в зубцах (Тл) напряженность магнитного поля (А/см)	$t_{2(1/3)}=\pi(D_{н2}-(4/3)h_{п2})/z_2$ $b_{з2(1/3)}=t_{2(1/3)}-b_{п2}$ $B_{з2(1/3)}=t_2B_\delta/(b_{з2(1/3)}k_с)$ $H_{з2}$ — из Приложений 8 — 10	(6.153) (6.154) (6.155)
При $B_{з2\max}>1{,}8$ Тл: зубцовое деление ротора (мм) зубцовое деление ротора в минимальном сечении зубца (мм) ширина зубца (мм): в наиболее узкой части в наиболее широкой части в средней части	t_2 по (6.71) $t_{2\min}=\pi(D_{н2}-2h_{п2})/z_2$ $b_{з2\min}=t_{2\min}-b_{п2}$ $b_{з2\max}=t_2-b_{п2}$ $b_{з2ср}=(b_{з2\min}+b_{з2\max})/2$	 (6.156) (6.157) (6.158) (6.159)
Магнитная индукция в зубцах ротора (Тл): в наиболее узкой части	 $B_{з2\max}$ — по (6.93)	

в наиболее широкой части	$B_{з2min}=t_2B_\delta/(b_{з2max}k_c)$	(6.160)
в средней части	$B_{з2ср}=t_2B_\delta/(b_{з2ср}k_c)$	(6.161)
Коэффициент зубцов в наиболее узкой части	$k_{з2max}=[t_{2min}/(b_{з2min}k_c)]-1$	(6.162)
в наиболее широкой части*	$k_{з2min}=[t_2/(b_{з2max}k_c)]-1$	(6.163)
в средней части*	$k_{з2ср}=(k_{з2max}+k_{з2min})/2$	(6.164)
Напряженность магнитного поля (А/см): в наиболее узкой части	$H_{з2}$ — из Приложений 14 — 16	
в наиболее широкой части	$H_{з2min}=f(B_{з2min}, k_{з2min})$ — из Приложений 8 — 10 или 14 — 16	
в средней части	$H_{з2ср}=f(B_{з2ср}, k_{з2ср})$ — из Приложений 8 — 10 или 14 — 16	
Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{з2}=(H_{з2max}+4H_{з2ср}+H_{з2min})/6$	(6.165)
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з2}=h_{п2}$	(6.166)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2}=0{,}1H_{з2}L_{з2}$	(6.167)

МДС для спинки статора

Напряженность магнитного поля (А/см): при $2p=2$ и $B_{c1}\leqslant 1{,}4$ Тл, а также при $2p\geqslant 4$	H_{c1} — из Приложений 11 — 13	
при $2p=2$ и $B_{c1}>1{,}4$ Тл	H_{c1} — из Приложений 5 — 7; при этом значение B_{c1}, выбранное из табл. 6.13, уменьшают на 0,4 Тл	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{c1}=\pi(D_{н1}-h_{c1})/(4p)$	(6.168)
МДС для спинки статора (А)	$F_{c1}=0{,}1H_{c1}L_{c1}$	(6.169)

МДС для спинки ротора

Напряженность магнитного поля (А/см): при $2p=2$	H_{c2} — из Приложений 11 — 13	
при $2p\geqslant 4$	H_{c2} — из Приложений 5 — 7	
Средняя длина пути магнитного потока (мм): при $2p=2$	$L_{c2}=h_{c2}+2d_{к2}/3$	(6.170)
при $2p\geqslant 4$	$L_{c2}=\pi(D_2+h_{c2}+(4/3)d_{к2})/(4p)$	(6.171)
МДС для спинки ротора (А)	$F_{c2}=0{,}1H_{c2}L_{c2}$	(6.172)

Параметры магнитной цепи		
Суммарная МДС магнитной цепи на один полюс (А)	$F_{\Sigma}=F_{\delta}+F_{31}+F_{32}+F_{c1}+F_{c2}$	(6.173)
Коэффициент насыщения магнитной цепи	$k_{нас}=F_{\Sigma}/F_{\delta}$	(6.174)
Намагничивающий ток (А)	$I_{м}=2{,}22F_{\Sigma}p/(m_1\omega_1k_{об1})$	(6.175)
То же, в относительных единицах	$I_{м}=I_{м}/I_1$	(6.176)
ЭДС холостого хода (В)	$E=k_{н}U_1$	(6.177)
Главное индуктивное сопротивление (Ом)	$x_{м}=E/I_{м}$	(6.178)
То же, в относительных единицах	$x_{м*}=x_{м}I_1/U_1$	(6.179)

6.7. Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Основные положения. Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора — параметров схемы замещения асинхронной машины — необходимо для расчета режима х.х., номинальных параметров, рабочих и пусковых характеристик, а также построения круговых диаграмм.

Активные сопротивления рассчитывают для температуры 20 °С, а при определении потерь их приводят к стандартной рабочей температуре по ГОСТ 183 — 74, как указано в § 4.1, путем умножения их на коэффициент $m_{т}$.

При расчете индуктивных сопротивлений поле рассеяния условно разбивают на три составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждой составляющей определяют магнитную проводимость ($\lambda_{п}$; $\lambda_{д}$; $\lambda_{л}$); суммируют эти проводимости и по ним рассчитывают индуктивное сопротивление.

Проводимость пазового рассеяния зависит от формы и размеров паза. В двухслойных обмотках с укороченным шагом в некоторых пазах располагаются катушки или стержни, принадлежащие разным фазам, вследствие чего потокосцепление такой обмотки уменьшается. Это явление учитывается введением в расчетные формулы коэффициентов $k_{\beta1}$ и $k'_{\beta1}$, зависящих от β_1.

Проводимость дифференциального рассеяния обусловлена высшими гармоническими. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора; демпфирующую реакцию этих токов учитывают только при короткозамкнутом роторе. Скос пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов.

Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки зависит от количества пазов на полюс и фазу, длины лобовой части катушки и от укорочения шага обмотки.

При пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющим глубокие пазы или двойную клетку, в том числе и в виде бутылочного паза, возникает явление вытеснения тока в обмотке ротора, которое приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивления этой обмотки.

Кроме того, при пуске, а также в режимах работы от $s=1$ до $s_{кр}$ (соответствующего M_{max}) следует учитывать явление насыщения путей потоков рассеяния, которое зависит от величины токов, протекающих в пазах, и уменьшает индуктивные сопротивления статора и ротора. Таким образом, разным режимам работы двигателя — номинальному, пусковому и при M_{max} — соответствуют различные значения r'_2, x_1 и x'_2.

В настоящем разделе приведены формулы для определения активных и индуктивных сопротивлений обмоток при температуре 20 °С и без учета влияния явлений вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщения путей потоков рассеяния статора и ротора.

Активные и индуктивные сопротивления обмотки статора в относительных единицах (r_{1*}, x_{1*}) можно определить по разным формулам, но результат должен быть одинаков. Этим проверяется правильность определения r_1 и x_1. О правильности расчета x'_2 можно примерно судить по отношению $x_1/x'_2=0,7 — 1,0$.

Сопротивление обмотки статора. Расчет сопротивления обмотки статора проводят в следующей последовательности.

Активное сопротивление обмотки фазы при 20 °С (Ом)	$r_1=\omega_1 l_{ср1}/(p_{м20}a_1 cs\cdot 10^3)$	(6.180)
То же (о. е.)	$r_{1*}=r_1 I_1/U_1$	(6.181)
Проверка правильности определения r_{1*} (о. е.)	$r_{1*}=\pi D_1(A_1 J_1)l_{ср1}/(114\times$ $\times 10^4 m_1 U_1 I_1)$	(6.182)
Коэффициенты, учитывающие укорочение шага:		
при $\beta_1=0,65 — 1,0$	$k_{\beta1}=0,4+0,6\beta_1$	(6.183)
	$k'_{\beta1}=0,2+0,8\beta_1$	(6.184)
при $\beta_1<0,65$	$k_{\beta1}=0,4+0,85\beta_1$	(6.185)
	$k'_{\beta1}=1,1\beta_1$	(6.186)
Коэффициент проводимости рассеяния: для трапецеидального полузакрытого паза (рис. 6.8)	$\lambda_{п1}=[h_1/(3b_2)]\cdot k_{\beta1}+(3h_{к1}/(b_2+$ $+2b_{ш1})+h_{ш1}/b_{ш1}+h_2/b_2)k'_{\beta1}$	(6.187)
для прямоугольного полуоткрытого паза (рис 6 10)	$\lambda_{п1}=h_3/(4b_{п1})+((h_1-h_3)/(3b_{п1}))\times$ $\times k_{\beta1}+((3h_{к1})/(b_{п1}+2b_{ш1})+$ $+h_{ш1}/b_{ш1}+h_2/b_{п1})k'_{\beta1}$	(6 188)

для прямоугольного открытого паза (рис. 6.10)	$\lambda_{п1}=h_3/(4b_{п1})+((h_1-h_3)/(3b_{п1}))\times$ $\times k_{\beta 1}+((h_{к1}+h_{ш1}+h_2)/b_{п1})k'_{\beta 1}$	(6.189)
Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния	$k_{ш1}=1-0{,}033b^2_{ш1}/(t_{1\min}\delta)$	(6.190)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{д1}=0{,}9t_1(q_1k_{об1})^2k_{р1}k_{ш1}k_{д1}/(\delta k_\delta)$	(6.191)
Полюсное деление (мм)	$\tau=\pi D_1/(2p)$	(6.192)
Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки	$\lambda_{л1}=0{,}34(q_1/l_1)\cdot(l_{л1}-0{,}64\beta\tau)$	(6.193)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора	$\lambda_1=\lambda_{п1}+\lambda_{д1}+\lambda_{л1}$	(6.194)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (Ом)	$x_1=1{,}58f_1l_1\omega^2{}_1\lambda_1/(pq_1\cdot 10^8)$	(6.195)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (о. е.)	$x_{1*}=x_1I_1/U_1$	(6.196)
Проверка правильности определения x_{1*} (о. е.)	$x_{1*}=0{,}39(D_1A_1)^2l_1\lambda_1(f_1/50)\times$ $\times 10^{-7}/(m_1U_1I_1z_1)$	(6.197)

Здесь $p_{м20}=57$ См/мкм — удельная электрическая проводимость меди при 20 °С; $h_{к1}$, h_2, h_3 — размеры частей обмоток и паза (рис. 6.8 и 6.10), определяемые по табл. 6.21; размер обмотки $h_1=h_{п1}-h_{к1}-$ $-h_{ш1}-h_2-h_4$; $k_{р1}$ — коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора (для двигателей с фазным ротором $k_{р1}=1$; для двигателей с короткозамкнутым ротором значения $k_{р1}$ приведены в табл. 6.22); $k_{д1}$ — коэффициент дифференциального рассеяния статора, равный отношению суммы ЭДС, наведенных высшими гармониками поля статора, к ЭДС, наведенной первой гармоникой того же поля; $k_{д1}$ определяют по табл. 6.23.

Таблица 6.21

Форма паза статора	Высота, мм			
	h	$h_{к1}$	h_2	h_3, h_4
Полузакрытая	50—132 160—250 280—315	0,7 1,0 3,0	0,6 0,6	0 0,4 0,4
Полуоткрытая и открытая	280—355 400—450	3,0 3,5	1,9 2,55	1,0 5,0

Таблица 6.22

q_1	k_{p1} при следующих значениях z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,95/0,87	—	—	—	—	—
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	—	—	—
4	—	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	—	—
5	—	—	—	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	—
6	—	—	—	0,7/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	
8	—	—	—	—	—	0,53/0,47	0,51/0,46

Примечания: 1. В числителе приведены значения k_{p1} при скосе пазов $b_c = t_2$, а в знаменателе — при отсутствии скоса пазов. 2. Для значений z_2/p, отличающихся от приведенных в таблице и для дробных q_1, коэффициент следует определять интерполяцией.

Таблица 6.23

q_1	Коэффициент $k_{д1}$			q_1	Коэффициент $k_{д1}$		
	Однослойная обмотка с диаметральным шагом	Двухслойная обмотка с укороченным шагом для ротора			Однослойная обмотка с диаметральным шагом	Двухслойная обмотка с укороченным шагом для ротора	
		короткозамкнутого	фазного			короткозамкнутого	фазного
1,5	—	0,045	0,470	4	0,0089	0,0062	0,0062
2	0,0285	0,0235	0,0235	5	0,0065	0,0043	0,0043
2,5	—	0,0170	0,0180	6	0,0052	0,0030	0,0030
3	0,0141	0,0111	0,0111	8	—	0,0021	0,0021

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами. Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в следующей последовательности:

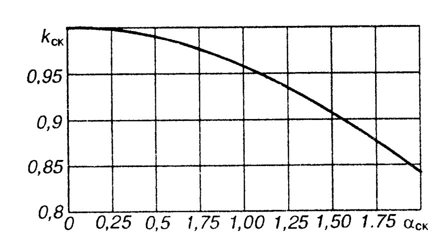


Рис. 6.17. Зависимость $k_{ск} = f(\alpha_{ск})$

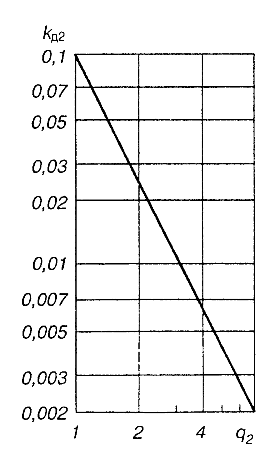


Рис. 6.18. Зависимость $k_{д2} = f(q_2)$ для короткозамкнутого ротора

Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С (Ом)	$r_{ст}=l_2/(\rho_{a20}S_{ст}\cdot 10^3)$	(6.198)
Коэффициент приведения тока кольца к току стержня	$k_{пр2}=2\sin(\pi p/z_2)$ при $z_2/(2p)\geqslant 6$; $k_{пр2}=2\pi p/z_2$	(6.199) (6.200)
Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня при 20 °С (Ом)	$r_{кл}=2\pi D_{кл.ср}/(\rho_{a20}z_2S_{кл}k^2{}_{пр2}10^3)$	(6.201)
Центральный угол скоса пазов (рад)	$\alpha_{ск}=2pt_1\beta_{ск1}/D_1$	(6.202)
Коэффициент скоса пазов ротора	$k_{ск}$ — по рис. 6.17	
Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора	$k_{пр1}=4m_1(\omega_1k_{об1}/k_{ск})^2/z_2$	(6.203)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r'_2=k_{пр1}(r_{ст}+r_{кл})$	(6.204)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (о. е)	$r_{2*}=r'_2I_1/U_1$	(6.205)
Ток стержня ротора для рабочего режима (А)	$I_2=(2\omega_1k_{об1}P_2/U_1z_2)\cdot(0{,}2+$ $+0{,}8\cos\varphi')10^3/(\eta'\cos\varphi')$	(6.206)
Коэффициент проводимости рассеяния: для овального полузакрытого паза ротора (рис. 6.11, *а*)	$\lambda_{п2}=h_{ш2}/b_{ш2}+((h_1+$ $+0{,}8r_2)/(6r_1))\times$ $\times(1-\pi r^2{}_1/(2S_{ст}))^2+0{,}66-$ $-b_{ш2}/(4r_1)$	(6.207)
для овального закрытого паза (рис. 6.11, *б*)	$\lambda_{п2}=((h_1+0{,}8r_2)/(6r_1))\times$ $\times(1-\pi r^2{}_1/(2S_{ст}))^2+$ $+0{,}66-b_{ш2}/(4r_1)+0{,}3$	(6.208)
Количество пазов ротора на полюс и фазу	$q_2=z_2/(2pm_1)$ из (6.10)	
Коэффициент дифференциального рассеяния ротора	$k_{д2}=f(q_2)$ — по рис. 6.18	
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{д2}=0{,}9t_2(z_2/6p)^2k_{д2}/(\delta k_\delta)$	(6.209)
Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки	$\lambda_{кл}=(2{,}9D_{кл\,ср}/(z_2l_2k^2{}_{пр2}))\times$ $\times\lg(2{,}35D_{кл\,ср}/(h_{кл}+l_{кл}))$	(6.210)
Относительный скос пазов ротора в долях зубцового деления ротора	$\beta_{ск2}=\beta_{ск}t_1/t_2$	(6.211)
Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов	$\lambda_{ск}=t_2\beta^2{}_{ск2}/(9{,}5\delta k_\delta k_{нас})$	(6.212)

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора	$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}$	(6.213)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора (Ом)	$x_2 = 7{,}9 f_1 l_2 \lambda_2 10^{-9}$	(6.214)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)	$x'_2 = k_{пр1} x_2$	(6.215)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)	$x'_{2*} = x'_2 I_1 / U_1$	(6.216)
Проверка правильности определения x'_2	$x_1 / x'_2 \approx 0{,}7 \div 1{,}0$	(6.217)

Здесь $\rho_{а20}$ — удельная электрическая проводимость алюминия при 20 °С [при использовании для заливки беличьей клетки ротора алюминия А5 (обычно применяемый) $\rho_{а20} = 27$ См/мкм, при использовании алюминиевого сплава АКМ12-4 (для асинхронных двигателей с повышенным скольжением) $\rho_{а20} = 15$ Ом/мкм].

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с бутылочными закрытыми пазами. На рис. 6.19 приведена схема замещения ротора с бутылочными пазами. Обычно такие роторы выполняют без скоса пазов. Высота верхней части бутылочного паза $h \leqslant 15$ мм; вытеснение тока при пуске двигателя в этой части паза можно не учитывать. Для нижней части паза расчет проводят так же, как для овального паза с заменой индексов (добавления в индексе буквы «н»).

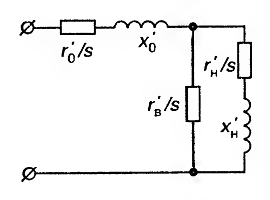


Рис. 6.19. Схема замещения ротора с бутылочными пазами

Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в следующей последовательности.

Активное сопротивление верхней части стержня при 20 °С (Ом)	$r_{ст.в} = l_2 / (\rho_{а20} S_{ст.в} 10^3)$	(6.218)
Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, при 20 °С (Ом)	$r_{кл}$ по (6.201)	
Активное сопротивление верхней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом)	$r'_{ст.в} = k_{пр1} r_{ст.в}$	(6.219)
Активное сопротивление нижней части стержня при 20 °С (Ом)	$r_{ст.н} = l_2 / (\rho_{а20} S_{ст.н} 10^3)$	(6.220)
Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом)	$r'_{ст.н} = k_{пр1} r_{ст.н}$	(6.221)
Активное сопротивление короткозамыкающих колец (общей цепи ротора), приведенное к статору, при 20 °С (Ом)	$r'_0 = k_{пр1} r_{кл}$	(6.222)

Активное результирующее сопротивление ротора при 20 °С (Ом)	$r'_2 = r'_0 + (r'_{ст.в} r'_{ст.н})/(r'_{ст.в} + r'_{ст.н})$	(6.223)
Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda_{2н} = [((h_1 + 0{,}8r_2)/(6r_1)) \cdot (1 - \pi r_1^2/(2S_{ст}))^2 + 0{,}66 - b/(4r_1)] + (h - 0{,}18)/(2b)$	(6.224)
Суммарный ток (А) верхней и нижней частей стержня	I_2 — по (6.206)	
Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции нижнего и верхнего пазов	$\lambda_{н.в} = (h + 0{,}1b)/(2b) + 1{,}09$	(6.225)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{д2}$ — по (6.209)	
Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец	$\lambda_{кл}$ — по (6.210)	
Коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора	$\lambda_{2о} = \lambda_{н.в} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл}$	(6.226)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda'_{2н} = \lambda_{2н} l_2 z_1 k^2_{об}/(l_1 z_2)$	(6.227)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора	$\lambda'_{2о} = \lambda_{2о} l_2 z_1 k^2_{об}/(l_1 z_2)$	(6.228)
Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору (Ом)	$x'_н = x_1 \lambda'_{2н}/\lambda_1$	(6.229)
Индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом)	$x'_о = x_1 \lambda'_{2о}/\lambda_1$	(6.230)
Индуктивное результирующее сопротивление (Ом)	$x'_2 = x'_о + x'_н(S_{ст.н}/(S_{ст.н} + S_{ст.в}))^2$	(6.231)
Активное приведенное результирующее сопротивление ротора (о. е.)	r'_{2*} — по (6.205)	
Индуктивное приведенное результирующее сопротивление обмотки ротора (о. е.)	x'_{2*} — по (6.216)	

Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой. Расчет сопротивлений обмотки ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой проводят аналогично расчету для ротора с овальными пазами, но со следующими особенностями. При определении активного сопротивления стержня клетки необходимо в (6.198) добавить слагаемое, учитывающее сопротивление лобовых частей стержня (Ом)

$$r_{ст.л} = (l_{ст} - l_2)/(\rho_{а20} S_{ст} \cdot 10^3), \qquad (6.232)$$

а также принять проводимость алюминиевых стержней при 20 °С равной 30; поэтому в (6.198) в знаменателе следует подставить $\rho_{а20}=30$.

Как правило, двигатели с прямоугольными открытыми пазами ротора и со сварной клеткой выполняются без скоса пазов; поэтому $k_{ск}=0$ и $\lambda_{ск}=0$. Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза

$$\lambda_{п2}=(h_{п2}-h_{ш2})/(3b_{п2})+h_{ш2}/b_{п2}. \qquad (6.233)$$

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец сварной клетки:

$$\lambda_{кл}=(2{,}3D_{кл.ср}/(z_2 l_2 k^2{}_{пр}))\lg(2{,}35D_{кл.ср}/(h_{кл}+l_{кл})). \qquad (6.234)$$

Сопротивление обмотки фазного ротора. Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в следующей последовательности.

Активное сопротивление обмотки фазы при 20 °С (Ом)	$r_2=\omega_2 l_{ср2}/(\rho_{м20}S_{ст}\cdot 10^3)$	(6.235)
Коэффициент приведения обмотки ротора к обмотке статора	$k_{пр}=(\omega_1 k_{об1}/(\omega_2 k_{об2}))^2$	(6.236)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r'_2=k_{пр}r_2$	(6.237)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)	r'_{2*} — по (6.205)	
Коэффициенты, учитывающие укорочение шага	$k_{\beta1}$ — по (6.183) или (6.185), а $k'_{\beta1}$ — по (6.184) или (6.186)	
Коэффициент проводимости рассеяния паза	$\lambda_{п2}=h_3/(4b_{п2})+((h_1-$ $-h_3)/(3b_{п2}))\cdot k_{\beta1}+(h_2/b_{п2}+$ $+3h_{к2}/(b_{п2}+2b_{ш2})+h_{ш2}/b_{ш2})k'_{\beta1}$	(6.238)
Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов ротора на проводимость дифференциального рассеяния	$k_{ш2}=1-0{,}033b^2{}_{ш2}/(t_2\delta)$	(6.239)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{д2}=0{,}9t_2(q_2k_{об2})^2k_{ш2}k_{д2}/(\delta k_\delta)$	(6.240)
Полюсное деление (мм)	$\tau_2=\pi D_{н2}/(2p)$	(6.241)
Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки	$\lambda_{л2}=0{,}34(q_2/l_2)\cdot(l_{л2}-0{,}64\beta\tau_2)$	(6.242)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки	$\lambda_2=\lambda_{п2}+\lambda_{д2}+\lambda_{л2}$	(6.243)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x_2=1{,}58f_1l_2\omega^2{}_2\lambda_2/(pq_2\ 10^8)$	(6 244)

Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x'_2=k_{пр}x_2$	(6.245)
Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (о. е.)	x'_{2*} — по (6.216)	
Проверка правильности определения x'_2	$x_1/x'_2\approx 0{,}7$ — 1,0	(6.247)

Здесь h_1, h_2, h_3, $h_{к2}$, $h_{ш2}$, $b_{п2}$, $b_{ш2}$ — размеры частей обмоток и паза, обозначенные на рис. 6.16. Указания по выбору размеров $h_{к2}$, $h_{ш2}$, $b_{п2}$, $b_{ш2}$, $b_{ст}$ приведены в § 6.5; параметры $h_2=1{,}1$ мм, $h_4=h_3=1{,}6$ мм (при $U_к\leqslant 750$ В), $h_2=1{,}7$ мм, $h_4=h_3=2{,}9$ мм (при $U_к>750$ В); размер обмотки $h_1=h_{п2}-h_{ш2}-h_{к2}-h_2-h_4$; $k_{д2}$ — коэффициент дифференциального рассеяния, определенный по рис. 6.20.

Сопротивления обмоток преобразованной схемы замещения двигателя (с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром). Для расчета различных режимов работы асинхронного двигателя удобнее пользоваться схемой замещения двигателя с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром. При этом сопротивления обмоток двигателя r_1, x_1, r'_2, x'_2, определенные для Т-образной схемы замещения, должны быть преобразованы путем умножения на некоторые комплексные коэффициенты [24]. Кроме того, активные сопротивления статора и ротора должны быть умножены на коэффициент $m_т$ (см. § 4.1), т. е. приведены к расчетной рабочей температуре, соответствующей классу нагревостойкости примененных изоляционных материалов и обмоточных проводов.

Введем следующие понятия: коэффициент рассеяния статора

$$\tau_1=x_1/x_м; \tag{6.246}$$

коэффициент сопротивления статора

$$\rho_1=r_1m_т/(x_1+x_м). \tag{6.247}$$

Тогда преобразованные сопротивления обмоток

$$\left.\begin{aligned} &r'_1=m_тr_1;\ \ x'_1=x_1(1+\tau_1)(1+r_1\rho_1/x_1);\\ &r''_2=m_тr'_2(1+\tau_1)^2(1+\rho^2_1);\quad x''_2=x'_2(1+\tau_1)^2(1+\rho^2_1).\end{aligned}\right\} \tag{6.248}$$

Когда $\rho_1\leqslant 0{,}1$ (а такие случаи встречаются достаточно часто), можно пользоваться упрощенными формулами

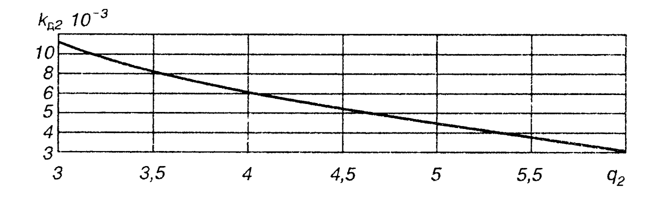


Рис. 6.20. Зависимость $k_{д2}=f(q_2)$ для фазного ротора

$$\left.\begin{aligned} r'_1 &= m_1 r_1;\ x'_1 = x_1(1+\tau_1);\\ r''_2 &= m_т r'_2(1+\tau_1)^2;\ x''_2 = x'_2(1+\tau_1)^2. \end{aligned}\right\} \quad (6.249)$$

Значение коэффициента τ_1 позволяет определить необходимость повторного расчета магнитной цепи; это требуется при коэффициенте насыщения $k_{нас} \geqslant 1{,}7$ и $\tau_1 \geqslant 0{,}05$. Тогда определяют ЭДС х.х. (В)

$$E_0 = U_1/((1+\tau_1)(1+\rho^2{}_1)^{1/2}). \quad (6.250)$$

Если E_0 из (6.250) отличается от $E = k_н U_1$ из (6.177) более чем на 3%, то повторяют расчет магнитной цепи по (6.118) — (6.179) при магнитных индукциях B_δ, $B_{з1}$, $B_{з2}$, B_{c1} и B_{c2}, измененных пропорционально отношению E_0/E.

6.8. Режимы холостого хода и номинальный

Для режима х.х. должны быть определены ток и потери, а также коэффициент мощности.

Магнитные потери в зубцах статора (Вт)

$$P_{з1} = 1{,}7 p_{1/50} (f_1/50)^\beta B^2{}_{з1ср} m_{з1}. \quad (6.251)$$

При подстановке в (6.251) значений $p_{1/50}$ и β для разных марок стали при $f_1 = 50$ Гц можно получить:

для стали 2013

$$P_{з1} = 4{,}4 B^2{}_{з1ср} m_{з1}; \quad (6.252)$$

для стали 2312

$$P_{з1} = 3{,}0 B^2{}_{з1ср} m_{з1}; \quad (6.253)$$

для стали 2411

$$P_{з1} = 2{,}7 B^2{}_{з1ср} m_{з1}. \quad (6.254)$$

Если при определении МДС для прямоугольных открытых или полуоткрытых пазов статора $B_{з1max} > 1{,}8$ Тл, что потребовало определения $B_{з1ср}$, то следует рассчитать $B_{з1ср}$, пользуясь (6.130) — (6.132) и (6.134).

Магнитные потери в спинке статора (Вт)

$$P_{c1} = 1{,}7 p_{1/50} (f_1/50)^\beta B^2{}_{c1} m_{c1}, \quad (6.255)$$

где m_{c1} — масса спинки статора.

При подстановке в (6.255) значений $p_{1/50}$ и β для разных марок стали при $f_1 = 50$ Гц можно получить:

для стали 2013

$$P_{c1}=4{,}4B^2{}_{c1}m_{c1};\qquad(6.256)$$

для стали 2312

$$P_{c1}=3{,}0B^2{}_{c1}m_{c1};\qquad(6.257)$$

для стали 2411

$$P_{c1}=2{,}7B^2{}_{c1}m_{c1}.\qquad(6.258)$$

Если $\rho_1\leqslant 0{,}1$, то при расчете режимов х.х. и номинального, а также при расчете рабочих характеристик можно считать $\rho^2\approx 0$.

Расчет режима х.х. проводят в следующей последовательности.

Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении (А)	$I_{\text{с.р.}}=U_1/(x_{\text{м}}(1+\tau_1)(1+\rho^2{}_1))$	(6.259)
Электрические потери в обмотке статора при синхронном вращении (Вт)	$p_{\text{с.м}1}=m_1 I^2{}_{\text{с.р}} r'{}_1(1+\rho^2{}_1)$	(6.260)
Расчетная масса стали зубцов при трапецеидальных пазах (кг)	$m_{з1}=7{,}8z_1 b_{з1} h_{п1} l_1 k_{\text{с}}\cdot 10^{-6}$	(6.261)
То же, при прямоугольных пазах	$m_{з1}=7{,}8z_1 b_{з1\text{ср}} h_{п1} l_1 k_{\text{с}}\cdot 10^{-6}$	(6.262)
Магнитные потери в зубцах статора (Вт)	$P_{з1}$ — по (6.252), по (6.253) или по (6.254)	
Масса стали спинки статора (кг)	$m_{\text{с}1}=7{,}8\pi(D_{\text{н}1}-h_{\text{с}1})h_{\text{с}1} l_1 k_{\text{с}}\cdot 10^{-6}$	(6.263)
Магнитные потери по спинке статора (Вт)	$P_{\text{с}1}$ — по (6.256), по (6.257) или по (6.258)	
Суммарные магнитные потери в сердечнике статора, включающие добавочные потери в стали (Вт)	$P_{\text{с}\Sigma}=P_{з1}(1+2(k_\delta-$ $-1)(t_1/10)^{1/2})+P_{\text{с}1}$	(6.264)
Механические потери (Вт) при степени защиты IP23 и радиальной системе вентиляции;	$P_{\text{мх}\Sigma}=k_{\text{мх}}(n_1/1000)^2(D_1/100)^3$	
способе охлаждения IC01:	$k_{\text{мх}}=5{,}5$ при $2p=2$	(6.265)
без радиальных вентиляционных каналов	$k_{\text{мх}}=6{,}5$ при $2p\geqslant 4$	
с радиальными вентиляционными каналами	$P_{\text{мх}\Sigma}=(n_{\text{к}}+11)(n_1/1000)^2\times$ $\times(D_1/100)^3$	(6.266)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0141	$P_{\text{мх}\Sigma}=k_{\text{мх}}(n_1/1000)^2(D_{\text{н}1}/100)^4$ $k_{\text{мх}}=1{,}3(1-D_{\text{н}1}/1000)$ при $2p=2$ $k_{\text{мх}}=1{,}0$ при $2p\geqslant 4$	(6.267)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0151	$P_{\text{мх}\Sigma}=(n_{\text{к}}+11)(n_1/1000)^2\times$ $\times(D_l/100)^3+(n_1/1000)^2\times$ $\times(0{,}6D_{\text{н}1}/100)^4$	(6.268)

Активная составляющая тока х.х. (А)	$I_{оа}=(P_{с.м1}+P_{с\Sigma}+P_{мх})/(m_1 U_1)$	(6.269)
Ток х.х. (А)	$I_о=(I^2_{оа}+I^2_{с.р})^{1/2}$	(6.270)
Коэффициент мощности при х.х.	$\cos\varphi_о=I_{о.а}/I_о$	(6.271)

Параметры номинального режима работы и рабочие характеристики могут быть получены аналитически и по круговой диаграмме. В последнее время в связи с широким использованием ЭВМ большее применение находят аналитические способы.

Предлагаемая методика аналитического расчета разработана проф. Т. Г. Сорокером. На рис. 6.21 приведена преобразованная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением

$$R_н=r''_2(1/s-1). \quad (6.272)$$

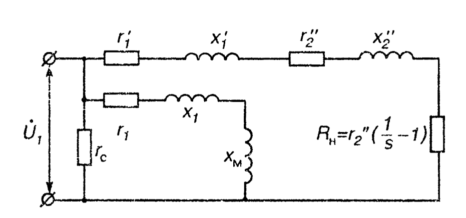


Рис. 6.21. Преобразованная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением $R_н$

Расчет параметров номинального режима работы проводят в такой последовательности.

Активное сопротивление к.з. (Ом)	$r_к=r'_1+r''_2$	(6.273)
Индуктивное сопротивление к.з. (Ом)	$x_к=x'_1+x''_2$	(6.274)
Полное сопротивление к.з. (Ом)	$z_к=(r^2_к+x^2_к)^{1/2}$	(6.275)
Добавочные потери при номинальной нагрузке (Вт)	$P_д=0{,}005P_2\cdot 10^3/\eta'$	(6.276)
Механическая мощность двигателя (Вт)	$P'_2=P_2\cdot 10^3+P_{мх}+P_д$	(6.277)
Эквивалентное сопротивление схемы замещения (Ом)	$R_н=m_1 U^2_1/(2P'_2)-r_к+$ $+((m_1 U^2_1/(2P'_2)-r_к)^2-z^2_к)^{1/2}$	(6.272а)
Полное сопротивление схемы замещения (Ом)	$Z_н=((R_н+r_к)^2+x^2_к)^{1/2}$	(6.278)
Проверка правильности расчетов $R_н$ и $z_н$ ($Ом^{-1}$)	$R_н/z^2_н=P'_2/(m_1 U^2_1)$	(6.279)
Скольжение (о.е.)	$S_н=1/(1+R_н/r''_2)$	(6.280)
Активная составляющая тока статора при синхронном вращении (А)	$I_{с\,а}=(P_{с\,м1}+P_{с\Sigma})/(m_1 U_1)$	(6.281)
Ток ротора (А)	$I''_2=U_1/z_н$	(6.282)

Ток статора (А): активная составляющая реактивная составляющая	$I_{a1}=I_{ca}+I''_2((R_н+r_к)(1-\rho_1)^2+$ $+x_к 2\cdot\rho_1)/(z_н\cdot(1+\rho^2_1))$ $I_{p1}=I_{c.p}+I''_2((x_к(1-\rho^2_1)-$ $-(R_н-r_к)\cdot 2\cdot\rho_1)/(z_н\cdot(1+\rho^2_1))$	(6.283) (6.284)
Фазный ток	$I_1=(I^2_{a1}+I^2_{p1})^{1/2}$	(6.285)
Коэффициент мощности	$\cos\varphi=I_{a1}/I_1$	(6.286)
Линейная нагрузка статора (А/см)	$A_1=10I_1N_{п1}/(a_1t_1)$	(6.287)
Плотность тока в обмотке статора (А/мм²)	J_1 — по (6.41)	
Линейная нагрузка ротора (А/см)	$A_2=A_1I''_2(1+\tau_1)(1+\rho^2_1)^{1/2}\times$ $\times k_{об1}/(I_1k_{об2}k_{ск})$ Для короткозамкнутого ротора $k_{об2}=1$	(6.288)
Ток в стержне короткозамкнутого ротора (А)	$I_{ст}=I''_2 2m_1\omega_1k_{об1}(1+\tau_1)\times$ $\times(1+\rho^2_1)^{1/2}/(z_2k_{ск})$	(6.289)
Плотность тока в стержне короткозамкнутого ротора (А/мм²)	$J_{ст}=I_{ст}/S_{ст}$	(6.290)
Ток в короткозамыкающем кольце (А)	$I_{кл}=I_{ст}/k_{пр2}$	(6.291)
Ток в верхней части стержня ротора с бутылочными пазами (А)	$I_{ст.в}=I_{ст}[1-r'_в/(r'_в+r'_н)]$	(6.292)
То же, в нижней части	$I_{ст.н}=I_{ст}r'_в/(r'_в+r'_н)$	(6.293)
Ток (фазный) фазного ротора (А)	$I_2=I''_2\omega_1k_{об1}(1+\tau_1)\times$ $\times(1+\rho^2_1)^{1/2}/(\omega_1k_{об1})$	(6.294)
Плотность тока в обмотке фазного ротора (А/мм)	$J_2=I_2/c_2s_{ст}a_2$	(6.295)
Электрические потери в обмотке статора и ротора (Вт) соответственно	$P_{м1}=m_1I^2_1r_1$ $P_{м2}=m_1I_2''^2r''_2$	(6.296) (6.297)
Суммарные потери в электродвигателе (Вт)	$P_\Sigma=P_{м1}+P_{м2}+P_{c\Sigma}+P_{мх}+P_д$	(6.298)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1=P_2\cdot 10^3+P_\Sigma$	(6.299)
Коэффициент полезного действия (%)	$\eta=(1-P_\Sigma/P_1)100$	(6.300)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1=m_1I_{a1}U_1$	(6.301)

Правильность вычислений (с точностью до округлений) по (6.301) и по (6.299) подтверждается их равенством

Мощность P_2 по (6.302) должна соответствовать заданной в § 6.1	$P_2=m_1I_1U_1\cos\varphi(\eta/100)$	(6.302)

6.9. Круговая диаграмма и рабочие характеристики

Рабочими характеристиками называют зависимости I_1; η; $\cos\varphi$ и $s=f(P_2)$. Они могут быть рассчитаны аналитически или определены по круговой диаграмме. Даже если рабочие характеристики определяют аналитически, то построение круговой диаграммы желательно, так как она дает наглядное представление об особенностях спроектированного двигателя.

Расчет и построение круговой диаграммы проводят в следующей последовательности (рис. 6.22). Выбирают масштаб тока c_T таким, чтобы диаметр рабочего круга диаграммы был в пределах 200 — 300 мм. Определяют диаметр рабочего круга (мм)

$$D_a = U_1/(c_I x_к). \tag{6.303}$$

Определяют масштаб мощности (кВт/мм)

$$c_P = m_1 U_1 c_I \cdot 10^{-3}. \tag{6.304}$$

От начала прямоугольных координат (точка O_1) вдоль оси абсцисс откладывают (в масштабе тока): отрезок O_1O_2, равный $I_{с.р}$ (6.259), по оси ординат — отрезок O_1O_3, равный $I_{с.а}$ (6.281). Конец вектора тока, построенного по этим составляющим, дает точку O. Из этой точки проводят прямую, параллельную оси абсцисс. На ней откладывают отрезок $OB = 100$ мм. Из точки B про-

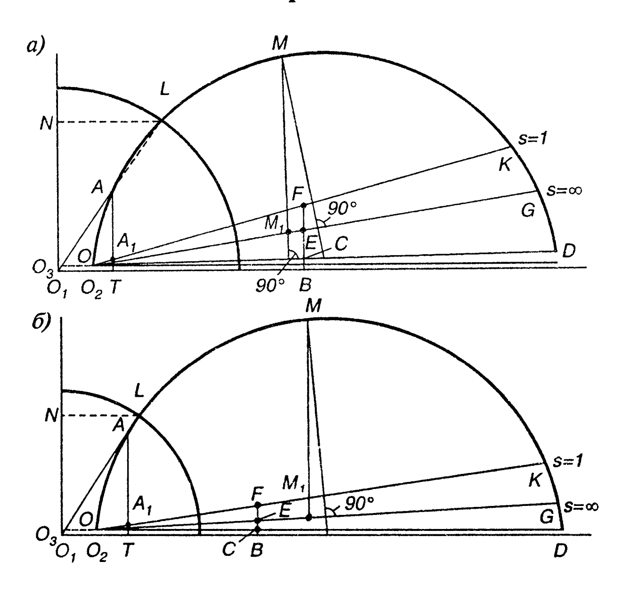


Рис. 6.22. Круговые диаграммы: *а* — двигателя № 1; *б* — двигателя № 2

водят перпендикуляр к оси абсцисс и на нем откладывают отрезки (мм)

$$BC = 2\rho_1 \cdot 100;\ BE = r'_1\, 100/x_к;\ BF = r_к \cdot 100/x_к. \qquad (6.305)$$

Через точки O и C проводят линию, на которой откладывают отрезок OD, равный диаметру рабочего круга $D_а$. На диаметре OD строят окружность круговой диаграммы. Через точки O и E проводят прямую до пересечения с окружностью в точке G; эта точка соответствует скольжению $s = \infty$. Прямая OG — линия электромагнитных моментов или мощностей. Через точки O и F проводят прямую до пересечения с окружностью в точке K, эта точка соответствует $s = 1$. Прямая OK является линией механических мощностей P'_2. Для построения вспомогательной окружности, облегчающей определение $\cos\varphi$, из точки O_1 радиусом 100 мм проводится четверть окружности. Для определения на круговой диаграмме точки, соответствующей номинальной мощности, следует найти на окружности токов точку A_1, расстояние от которой до линии механических мощностей по линии AA_1, перпендикулярной диаметру OD, равно P'_2 [по (6.277)] (в масштабе мощности c_P).

Коэффициент мощности можно определить следующим образом: продлить вектор тока статора (для заданного значения отдаваемой мощности) до пересечения со вспомогательной окружностью в точке L; из точки L провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения оси ординат в точке N, отрезок $O_1N/100$ (мм) дает значение $\cos\varphi$. Для определения отрезка, соответствующего максимальному моменту (без учета явлений насыщения путей потоков рассеяния и без учета явления вытеснения тока), необходимо выполнить следующие построения. Из центра круговой диаграммы (середина отрезка OD) провести линию, перпендикулярную линии моментов OG, до пересечения с окружностью в точке M. Из этой точки опустить перпендикуляр к линии диаметров до пересечения с линией моментов в точке M_1. Отрезок MM_1 (в масштабе мощности) определяет величину максимального момента.

Рабочие характеристики можно рассчитать и построить также с помощью круговой диаграммы. Покажем определение искомых параметров I_1; $\cos\varphi$; η и s по круговой диаграмме для одной точки рабочей характеристики, соответствующей номинальному значению P_2 и P'_2 (точка A на рис. 6.22). Ток статора I_1 определяется отрезком O_1A, ток ротора I''_2 — отрезком OA, в масштабе тока c_I. Для определения $\cos\varphi$ необходимо продлить вектор тока I_1 (отрезок O_1A) до пересечения с вспомогательной окружностью $\cos\varphi$ в точке L, провести из точки L линию параллельно оси абсцисс до пересечения оси ординат в точке N. Значение отрезка O_1N (мм), деленное на

100, соответствует искомому $\cos\varphi$. Подводимая мощность P_1 равна длине перпендикуляра AT к оси абсцисс (в масштабе мощности $c_р$). По полученным из круговой диаграммы значениям I_1; I''_2 и P_1 определяют $P_{м1}$; $P_{м2}$; P_Σ; η по формулам (6.296) — (6.300). Скольжение определяют по формуле

$$s = P_{м2}/(P'_2 + P_{м2}). \qquad (6.306)$$

Аналогичные расчеты выполняют для других значений мощностей, равных $0{,}25P_2$; $0{,}5P_2$; $0{,}75P_2$; $1{,}25P_2$, определяя вначале на круговой диаграмме точки, соответствующие этим значениям мощностей (аналогично нахождению точки А).

Для аналитического расчета рабочих характеристик можно воспользоваться формулами, применяемыми для определения номинальных значений I_1, η, $\cos\varphi$ и s при номинальном значении P_2. По этим формулам можно рассчитать интересующие нас параметры для пяти значений P_2 ($0{,}25P_2$; $0{,}5P_2$; $0{,}75P_2$; $1{,}0P_2$ и $1{,}25P_2$) и построить рабочие характеристики (в формулы вместо P_2 необходимо подставить соответствующие долевые значения P_2). При расчете $P_д$ по (6.276) условно принимают значение КПД для долевых значений P_2 равным η' при номинальном значении P_2. Результаты расчетов целесообразно свести в таблицу.

Примеры построения рабочих характеристик, рассчитанных аналитически, приведены на рис. 6.23. При построении характеристик необходимо иметь в виду, что при $P_2=0$; $I_1=I_0$; $\cos\varphi=\cos\varphi_0$; $\eta=0$, $s=s_0$ (индекс «0» соответствует х.х.).

Круговые диаграммы для двигателей № 1 и 2 построены на рис. 6.22, *а*, *б*.

По данным таблицы (Приложение 26) построены рабочие характеристики двигателя № 1 на рис. 6.23, *а*, двигателя № 2 — на рис. 6.23, *б*.

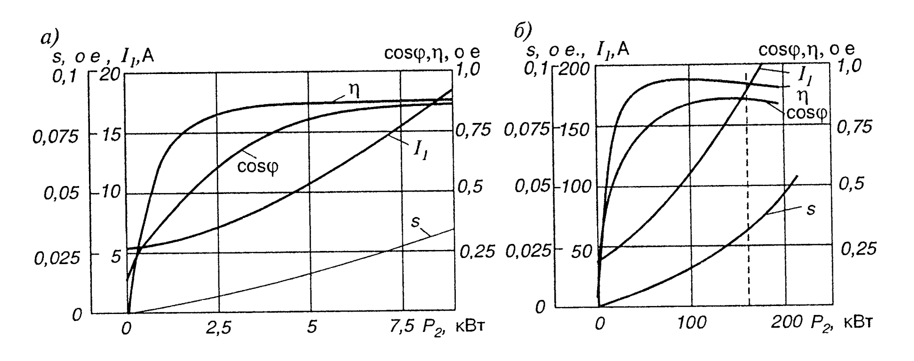


Рис 6.23. Рабочие характеристики: *а* - двигателя № 1; *б* — двигателя № 2

6.10. Максимальный момент

Максимальный момент асинхронного двигателя должен быть не менее предписанного ГОСТ 19523 — 74 или 9362 — 68. При нагрузках, соответствующих моментам, близким к максимальному, токи статора и ротора обычно в два с половиной — три раза больше, чем при номинальной нагрузке. При таких токах наступает насыщение путей потоков рассеяния, вызывающее уменьшение индуктивных сопротивлений статора и ротора и учитываемое при определении максимального момента. Вытеснением тока в обмотке ротора при определении максимального момента можно пренебречь, так как при критическом скольжении частота в роторе невелика.

Для расчета максимального момента можно воспользоваться схемой замещения, приведенной на рис. 6.21, но при этом сопротивление $R_н$ заменить на сопротивление $R_м$, а индуктивные сопротивления определить с учетом насыщения, соответствующего нагрузкам при максимальном моменте.

Для учета насыщения путей потоков рассеяния все рассчитанные магнитные проводимости статора и ротора ($\lambda_п$, $\lambda_д$ и $\lambda_л$) подразделяют на две части. К первой относятся все проводимости, зависящие от насыщения, т. е. переменные — часть проводимости пазового рассеяния (рассеяния клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора), проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора. Ко второй части — все проводимости, не зависящие от насыщения, т. е. постоянные — оставшаяся часть проводимости пазового рассеяния, проводимости рассеяния лобовых частей обмоток статора и фазного ротора, проводимости рассеяния короткозамыкающих колец и проводимость рассеяния скоса пазов.

Расчет максимального момента проводят в следующей последовательности.

Переменная часть коэффициента статора $\lambda_{п1}$ при: трапецеидальном полузакрытом пазе	$\lambda_{п1пер}=(3h_{к1}/(b_2+b_{ш1})+h_{ш1}/b_{ш1})k'_в$	(6.307)
прямоугольном полуоткрытом пазе	$\lambda_{п1пер}=(3h_{к1}/(b_{п1}+2b_{ш1})++h_{ш1}/b_{ш1})k'_в$	(6.308)
прямоугольном открытом пазе	$\lambda_{п1пер}=(h_{к1}+h_{ш1})\cdot k'_\beta/b_{п1}$	(6.309)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения	$\lambda_{1пер}=\lambda_{п1пер}+\lambda_{д1}$	(6.310)
Переменная часть коэффициента ротора $\lambda_{п2}$ при: овальном полузакрытом пазе	$\lambda_{п2пер}=h_{ш2}/b_{ш2}$	(6.311)

овальном закрытом пазе бутылочном закрытом пазе прямоугольном открытом пазе прямоугольном полузакрытом пазе	$\lambda_{п2пер}=1{,}12h_2\cdot 10^3/I_2$ $\lambda_{п2пер}=\lambda_{н.в.пер}=1{,}12h_2\cdot 10^3/I_2$ $\lambda_{п2пер}=h_{ш2}/b_{п2}$ $\lambda_{п2пер}=(3h_{к2}/(b_{п2}+2b_{ш2})+h_{ш2}/b_{ш2})k'_\beta$	(6.312) (6.313) (6.314) (6.315)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{2пер}=\lambda_{п2пер}+\lambda_{д2}$	(6.316)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя (при любой форме пазов статора и ротора кроме бутылочной): зависящее от насыщения (Ом) не зависящее от насыщения	$x_{пер}=x'_1\lambda_{1пер}/\lambda_1+x''_2\lambda_{2пер}/\lambda_2$ $x_{пост}=x'_1(\lambda_1-\lambda_{1пер})/\lambda_1+$ $+x''_2(\lambda_2-\lambda_{2пер})/\lambda_2$	(6.317) (6.318)
Для бутылочного закрытого паза ротора: преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом) преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом)	$x''_0=x'_0(1+\tau_1)^2$ $x''_н=x'_н(1+\tau_1)^2$	(6.319) (6.320)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пер}=x'_1\lambda_{1пер}/\lambda_1+x''_0\lambda_{2пер}/\lambda_{20}$	(6.321)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пост}=x'_1(\lambda_1-\lambda_{1пер})/\lambda_1+$ $+x''_0(\lambda_{20}-\lambda_{2пер})/\lambda_{20}+$ $+x''_н(S_{ст.н}/(S_{ст.в}+S_{ст.н}))^2$	(6.322)
Ток ротора, соответствующий максимальному моменту, при любой форме пазов статора, при открытых или полузакрытых пазах ротора (А)	$I''_{м2}=U_1/(2\,(r'^2_1+(x_{пост}+$ $+0{,}0825x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+$ $+0{,}0825x_{пер})))^{1/2}-$ $-(1{,}24\cdot 10^3\delta a_1(r'_1+2(x_{пост}+$ $+0{,}0825x_{пер}))x_{пер})/(2N_{п1}(r'^2_1+$ $+(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})^2+$ $+r'_1\cdot(x_{пост}+0{,}0825x_{пер})))$	(6.323)
То же, при закрытых овальных или бутылочных пазах ротора	$I''_{м2}=U_1/(2\,(r'^2_1+(x_{пост}+$ $+0{,}25x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+$ $+0{,}25x_{пер})))^{1/2}-1{,}24\times$ $\times 10^3\delta a_1(r'_1+2(x_{пост}+$ $+0{,}25x_{пер}))x_{пер}/(2N_{п1}\cdot(r'^2_1+$ $+(x_{пост}+0{,}25x_{пер})^2+r'_1(x_{пост}+$ $+0{,}25x_{пер})))$	(6.324)

Полное сопротивление схемы замещения (Ом) при максимальном моменте:	$Z_м = U_1/I''_{м2}$	(6.325)
при бесконечно большом скольжении ($s > \infty$)	$z_\infty = 0{,}5(r'^2_1 + x_к^2)^{1/2}$	(6.326)
Эквивалентное сопротивление схемы замещения при максимальном моменте (Ом)	$R_м = z_\infty + r'_1$	(6.327)
Кратность максимального момента	$M_{max}/M_н = m_1 U_1^2(1 - s'_н)/(2R_м \times$ $\times P_2 10^3)$	(6.328)
Скольжение при максимальном моменте (о.е.)	$S_м = r''_2/z_\infty$	(6.329)

6.11. Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент

Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором характеризуются значениями начальных пускового тока и момента (ГОСТ 19523 — 74 или 9362 — 68). При определении пусковых тока и момента необходимо учитывать два явления, происходящие в двигателях с короткозамкнутым ротором, при пуске — вытеснение тока в пазах короткозамкнутой обмотки ротора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора.

Вследствие вытеснения тока увеличивается r''_2 и уменьшается x''_2, а в результате насыщения уменьшаются x'_1 и x''_2, поэтому расчет пускового режима следует начинать с определения активных и индуктивных сопротивлений, соответствующих этому режиму. Последовательность расчета такая: определяют r''_2 и x''_2 с учетом вытеснения тока, затем учитывают влияния насыщения на уменьшение x'_1 и x''_2, разделяя индуктивное сопротивление к.з. при пуске на постоянную и переменную части.

Степень вытеснения тока в стержнях клетки ротора характеризуется приведенной высотой стержня:

$$\xi = 0{,}002 h_{ст}(b_{ст}/b_{п2})^{1/2} \times \times (27/m_т)^{1/2}(sf_1)^{1/2}, \quad (6.330)$$

где s — скольжение.

Для литой алюминиевой клетки $b_{ст} = b_{п2}$, тогда при $f = 50$ Гц

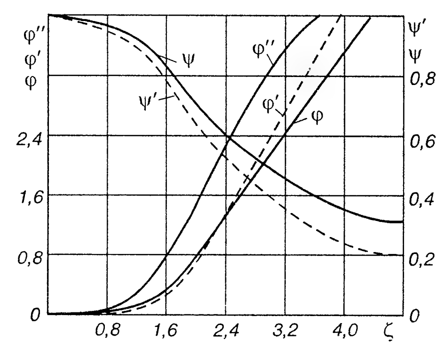


Рис. 6.24. Зависимости φ и $\psi = f(\xi)$

$$\xi = 0{,}0735 h_{ст}(s/m_т)^{1/2}. \quad (6.331)$$

Высота стержня (мм):
при полузакрытых пазах

$$h_{ст} = h_{п2} - h_{ш2}, \quad (6.332)$$

при закрытых пазах

$$h_{ст} = h_{п2} - h_2 - h_{ш2}. \quad (6.333)$$

Активные и индуктивные сопротивления, соответствующие пусковому режиму, определяют в следующей последовательности.

Овальный полузакрытый или закрытый паз ротора

Высота стержня клетки ротора (мм)	$h_{ст}$ — по (6.332) или по (6.333)	
Приведенная высота стержня ротора	ξ — по (6.331)	
Коэффициент φ	$\varphi = f(\xi)$ — по рис. 6.24	
Расчетная глубина проникновения тока в стержень (м)	$h_р = h_{ст}/(1+\varphi)$	(6.334)
Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм): при $r_1 \leqslant h_р \leqslant r_1 + h_1$ при $h_р < r_1$	$b_р = 2r_1 - 2(r_1 - r_2)(h_р - r_1)/h_1$ $b_р = 2(r_1^2 - (r_1 - h_р)^2)^{1/2}$	(6.335) (6.336)
Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм^2): при $r_1 \leqslant h_р \leqslant r_1 + h_1$ при $h_р < r_1$	$s_р = \pi {r_1}^2/2 + (r_1 + b_р/2)(h_р - r_1)$ $s_р = (r_1((b^2{}_р + 5{,}33h^2{}_р)^{1/2} - b_р) + b_р h_р)/2$	(6.337) (6.338)
Коэффициент вытеснения тока	$k_{в.т} = s_{ст}/s_р$	(6.339)
Активное сопротивление стержня клетки при 20 °С для пускового режима (Ом)	$r_{ст.п} = r_{ст} k_{в\,т}$	(6.340)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 °С, приведенное к обмотке статора (для пускового режима) (Ом)	$r'_{2п} = k_{пр1}(r_{ст\,п} + r_{кл})$	(6.341)
Коэффициент ψ	$\psi = f(\xi)$ — по рис. 6.24	
Коэффициент проводимости рассеяния паза ротора (при пуске): для овального полузакрытого паза для овального закрытого паза	$\lambda_{п2п} = h_{ш2}/b_{ш2} + (((h_1 + 0{,}8r_2)/(6r_1))(1 - \pi r^2{}_1/(2s_{ст}))^2 + 0{,}66 - b_{ш2}/(4r_1))\psi$ $\lambda_{п2п} = 0{,}3 + (((h_1 + 0{,}8r_2)/(6r_1))(1 - \pi r^2{}_1/(2s_{ст}))^2 + 0{,}66 - b_{ш2}/(4r_1))\psi$	(6.342) (6.343)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора при пуске	$\lambda_{2п} = \lambda_{п2п} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}$	(6.344)

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее и не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пер}=x'_1\lambda_{1пер}/\lambda_1+x''_2\lambda_{2пер}/\lambda_{2п}$ $x_{пост}=x'_1(\lambda_1-\lambda_{1пер})/\lambda_1+$ $+x''_2(\lambda_{2п}-\lambda_{2пер})/\lambda_{2п}$	(6.345) (6.346)
Активное сопротивление к.з. при пуске (Ом)	$r_{к.п}=r'_1+r'_{2п}m_т(1+\tau_1)^2(1+\rho_1^2)$	(6.347)

Прямоугольный открытый паз ротора и сварная алюминиевая клетка. Сопротивления обмоток определяют как для ротора с овальными пазами со следующими изменениями.

Коэффициент вытеснения тока

$$k_{в.т}=1+\varphi(l_2-n_кl_к)/l_2. \qquad (6.348)$$

Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза ротора

$$\lambda_{п2п}=\psi(h_{п2}-h_{ш2})/(3b_{п2})+h_{ш2}/b_{п2}. \qquad (6.349)$$

Для определения коэффициента ξ в (6.330) следует подставить $b_{ст}/b_{п2}=0{,}9$ и $\gamma_{ал}=30$ См/мкм (вместо $\gamma_{ал}=27$ См/мкм), при этом числовой коэффициент получается равным 0,735, что позволяет пользоваться формулой (6.331).

Бутылочный закрытый паз ротора

Высота стержня (мм)	$h_{ст}=h_{п2}-h_2$	(6.350)
Приведенная высота стержня ротора	ξ	(6.331)
Коэффициенты	φ и ψ — по рис. 6.24	
Расчетная глубина проникновения тока в нижнюю часть стержня (мм)	$h_{р\,н}=h_{ст}/(1+\varphi)-h$	(6.351)
Ширина нижней части стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм): при $r_1\leqslant h_{р.н}\leqslant r_1+h_1$ при $h_{р.н}<r_1$	 $b_{р.н}=2r_1-2(r_1-r_2)(h_{р.н}-r_1)/h_1$ $b_{р.н}=2(r^2{}_1-(r_1-h_р)^2)^{1/2}$	 (6.352) (6.353)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм^2): при $r_1\leqslant h_{р.н}\leqslant r_1+h_1$ при $h_{р\,н}<r_1$	 $s_{р\,н}=(\pi r^2{}_1/2)+(r_1+b_{р\,н}/2)(h_{р.н}-$ $-r_1)$; $s_{р\,н}=(r_1((b^2{}_{р\,н}+5{,}33h^2{}_{р\,н})^{1/2}-$ $-b_{р\,н})+b_{р.н}h_{р\,н})/2$	 (6.354) (6.355)
Коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня	$k_{в\,т\,н}=s_{ст\,н}/s_{р\,н}$	(6.356)

Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору (Ом)	$r'_{ст.н.п}=r'_{ст.н}k_{в.т.н}$	(6.357)
Активное результирующее сопротивление при 20 °C (Ом)	$r'_{2п}=r'_0+r'_{ст.в}r'_{ст.н.п}/(r'_{ст.в}+$ $+r'_{ст.н.п})$	(6.358)
Коэффициент	$\psi''=((h_{п2}-h_2)\psi-h)/(h_{п2}-h_2-h)$	(6.359)
Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda_{2н.п}=(((h_1+0{,}8r_2)/(6r_1))(1-$ $-\pi r^2{}_1/(2s_{ст.н}))^2+0{,}66-$ $-b/(4r_1))\psi''+(h+0{,}18)/(2b)$	(6.360)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda'_{2н.п}=\lambda_{2н.п}l_2z_1k^2{}_{об}/(l_1z_2)$	(6.361)
Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору (Ом)	$x'_{н.п}=x_1\lambda'_{2н.п}/\lambda_1$	(6.362)
Расчетная глубина проникновения тока в нижний стержень (для расчета x) (мм)	$h_{хн}=(h_{п2}-h_2)\psi-h$	(6.363)
Ширина нижнего стержня на расчетной глубине проникновения тока (для расчета x) (мм): при $r_1\leqslant h_{хн}\leqslant r_1+h_1$ при $h_{хн}<r_1$	 $b_{хн}=2r_1-2(r_1-r_2)(h_{хн}-r_1)/h_1$ $b_{хн}=2(r^2{}_1-(r_1-h_{хн})^2)^{1/2}$	 (6.364) (6.365)
Площадь поперечного сечения нижнего стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм): при $r_1\leqslant h_{хн}\leqslant r_1+h$ при $h_{хн}<r_1$	 $s_{хн}=\pi r^2{}_1/2+(r_1+b_{хн}/2)(h_{хн}-r_1)$ $s_{хн}=r_1((b^2{}_{хн}+5{,}33h^2{}_{хн})^{1/2}-$ $-b_{хн}h_{хн})/2$	 (6.366) (6.367)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{2пер}$ — по (6.316)	
Преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом)	x''_0 — по (6.319)	
Преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом)	$x''_{н.п}=x'_{н.п}(1+\tau_1)^2$	(6.368)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пер}$ — по (6.321)	
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пост}=x'_1(\lambda_1-\lambda_{1пер})/\lambda_1+$ $+x''_0(\lambda_{20}-\lambda_{2пер})/\lambda_{20}+$ $+x''_{н.п}(s_{хн}/(s_{хн}+s_{ст.в}))^2$	(6.369)
Активное сопротивление к.з. при пуске (Ом)	$r_{к\,п}$ -- по (6.347)	

Начальные пусковые ток и момент определяют в такой последовательности

Ток ротора при пуске для двигателей с открытыми и полузакрытыми пазами короткозамкнутого ротора и с любой формой пазов статора (А)	$I_{п2}'' = U_1/(r^2_{к.п} + (x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})^2)^{1/2} - 1{,}24 \times 10^3 \delta a_1 x_{пер}(x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})/(N_{п1}(r^2_{к.п} + (x_{пост} + 0{,}0825x_{пер})^2))$	(6.370)
То же, для двигателей с закрытыми пазами ротора	$I_{п2}'' = U_1/(r^2_{к.п} + (x_{пост} + 0{,}25x_{пер})^2)^{1/2} - 1{,}24 \times 10 \delta a_1 x_{пер}(x_{пост} + 0{,}25x_{пер})/(N_{п1}(r^2_{к.п} + (x_{пост} + 0{,}25x_{пер})^2))$	(6.371)
Полное сопротивление схемы замещения при пуске (с учетом явлений вытеснения тока и насыщения путей потоков рассеяния) (Ом)	$z_{к.п} = U_1/I''_{п2}$	(6.372)
Индуктивное сопротивление схемы замещения при пуске (Ом)	$x_{к.п} = (z^2_{к.п} - r^2_{к.п})^{1/2}$	(6.373)
Активная и реактивная составляющая тока статора при пуске (А)	$I_{п.а1} = I_{с.а} + I''_{п2}(r_{к.п}(1 - \rho^2_1) + x_{к.п} 2\rho^2_1)/(z_{к.п}(1 + \rho^2_1))$ $I_{п.р1} = I_{с.р} + I''_{п2}(x_{к.п}(1 - \rho^2_1) - r_{к.п} 2\rho_1)/(z_{к.п}(1 + \rho^2_1))$	(6.374) (6.375)
Фазный ток статора при пуске (А)	$I_{п1} = (I^2_{п.а1} + I^2_{п.р1})^{1/2}$	(6.376)
Кратность начального пускового тока	$I_{п1}/I_1$	(6.377)
Активное сопротивление ротора при пуске, приведенное к статору, при расчетной рабочей температуре и Г-образной схеме замещения (Ом)	$r''_{2п} = r'_{2п} m_т (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho^2_1)$	(6.378)
Кратность начального пускового момента	$M_п/M_н = m_1 I''^2_{п2} r''_{2п}(1 - s_н)/(P_2 \cdot 10^3)$	(6.379)

6.12. Тепловой и вентиляционный расчеты

Тепловой расчет асинхронного двигателя. Проводим его по упрощенной методике, изложенной в § 5.3.

При выполнении теплового расчета необходимо учитывать следующее.

1. Потери в обмотках вычисляют при сопротивлениях, приведенных к максимальной допускаемой температуре; для этого сопротивление, определенное при 20 °С, умножают на коэффициент $m'_т$ (см. § 5.1) в соответствии с выбранным классом нагревостойкости изоляции.

2. При тепловом расчете обмотки статора учитывают, что воздуху внутри двигателя передается только часть потерь в активной части статора (эта доля потерь равна коэффициенту k из табл. 6.24); остальные потери передаются непосредственно через станину наружному охлаждающему воздуху.

3. Для обмоток, не имеющих изоляцию катушек в лобовых частях, первое слагаемое в (6.396), а также $\Delta t_{и.л1}$ в (6.397) необходимо считать равными нулю.

Таблица 6.24

Количество полюсов $2p$	Коэффициент k для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
2; 4	0,20 — 0,22	0,80 — 0,84
6; 8	0,18 — 0,19	0,76 — 0,78
10; 12	0,16 — 0,17	0,72 — 0,74

4. При определении по (6.402) среднего превышения температуры воздуха внутри машины $\Delta t_в$ у асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 принимают, что воздух внутри двигателя нагревается всеми выделяемыми потерями (за исключением части потерь в статоре, передаваемых через станину), а у двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, кроме того, за исключением потерь на трение о воздух наружного вентилятора, составляющие примерно $0{,}9P_{мх\Sigma}$.

Обмотка статора. Тепловой расчет для определения превышения температуры обмотки статора проводят в следующей последовательности.

Потери в обмотке статора при максимальной допускаемой температуре (Вт)	$P'_{м1} = m_1 I^2{}_1 m'_т r'_1$	(6.380)
Условная внутренняя поверхность охлаждения активной части статора (мм²)	$S_{п1} = \pi D_1 l_1$	(6.381)
Условный периметр поперечного сечения (мм):		
трапецеидального полузакрытого паза	$\Pi_1 = 2h_{п1} + b_1 + b_2$	(6.382)
прямоугольного полуоткрытого и открытого пазов	$\Pi_1 = 2(h_{п1} + b_{п1})$	(6.383)
Условная поверхность охлаждения (мм²): пазов	$S_{и.п1} = z_1 \Pi_1 l_1$	(6.384)
лобовых частей обмотки	$S_{л1} = 4\pi D_1 l_{в1}$	(6.385)
двигателей без охлаждающих ребер на станине	$S_{маш} = \pi D_{н1}(l_1 + 2l_{в1})$	(6.386)
двигателей с охлаждающими ребрами на станине	$S_{маш\ р} = (\pi D_{н1} + 2n_р h_р)(l_1 + 2l_{в1})$	(6.387)

Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к внутренней поверхности охлаждения активной части статора (Вт/мм²)	$p_{п1} = k(P'_{м1} 2l_1/l_{ср1} + P_{c\Sigma})/S_{п1}$	(6.388)
То же, от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$P_{и.п1} = (P'_{м1} 2l_1/l_{ср1})/S_{и.п1}$	(6.389)
То же, от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки	$p_{л1} = (P'_{м1} 2l_{л1}/l_{ср1})/S_{л1}$	(6.390)
Окружная скорость ротора (м/с)	$v_2 = \pi D_{н2} n_1/60\,000$	(6.391)
Превышение температуры внутренней поверхности активной части статора над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{п1} = P_{п1}/\alpha_1$	(6.392)
Перепад температуры в изоляции паза и катушек из круглых проводов (°С)	$\Delta t_{и.п1} = p_{и.п1}(b_{и1}/\lambda_{экв} + (b_1 + b_2)/(16\lambda'_{экв}))$	(6.393)
То же, в изоляции паза и жестких катушек или полукатушек	$\Delta t_{и.п1} = p_{и.п1} b_{и1}/\lambda_{экв}$	(6.394)
Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)	$\Delta t_{л1} = p_{л1}/\alpha_1$	(6.395)
Перепад температуры в изоляции лобовых частей катушек из круглых проводов (°С)	$\Delta t_{и.л1} = p_{л1}(b_{и.л1}/\lambda_{экв} + h_{п1}/(12\lambda'_{экв}))$	(6.396)
То же, из жестких катушек или полукатушек	$\Delta t_{и.л1} = p_{л1} b_{и.л1}/\lambda_{экв}$	(6.397)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)	$\Delta t'_1 = (\Delta t_{п1} + \Delta t_{и.п1}) \cdot 2l_1/l_{ср1} + (\Delta t_{л1} + \Delta t_{и.л1}) \cdot 2l_{л1}/l_{ср1}$	(6.398)
Потери в двигателе со степенью защиты IP23, передаваемые воздуху внутри двигателя (Вт)	$P'_{\Sigma} = k(P'_{м1} 2l_1/l_{ср1} + P_{c\Sigma}) + P'_{м1} 2l_{л1}/l_{ср1} + P'_{м2} + P_{мх\Sigma} + P_{д}$	(6.399)
То же, для IP44	$P'_{\Sigma} = k(P'_{м1} 2l_1/l_{ср1} + P_{c\Sigma}) + P'_{м1} 2l_{л1}/l_{ср1} + P'_{м2} + 0{,}1P_{мх\Sigma} + P_{д}$	(6.400)
Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой наружного воздуха: без охлаждающих ребер на станине с охлаждающими ребрами на станине (°С)	$\Delta t_{в} = P'_{\Sigma}/(S_{маш}\alpha_{в})$; $\Delta t_{в} = P'_{\Sigma}/(S_{маш\ р}\alpha_{в})$	(6.401)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного воздуха (°С)	$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_{в}$	(6.402)

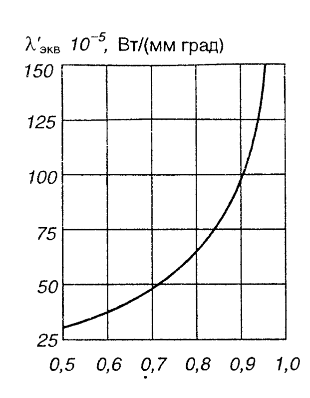


Рис. 6.25. Среднее значение $\lambda'_{экв}$

Здесь $n_р$ и $h_р$ — количество и высота охлаждающих ребер станины по данным § 3.4; k — из табл. 6.24; $\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки, зависящий от отношения диаметров изолированного и неизолированного провода d/d' (рис. 6.25); α_1 — коэффициент теплоотдачи поверхности статор определяют из рис. 6.26; $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха — находят по рис. 6.27; $b_{и1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу статора (при полуоткрытых и открытых пазах $b_{и1}=(b_{п1}-N_ш b)/2$, при полузакрытых $b_{и1}$ в § 6.3); $b_{ил1}$ — односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (см. Приложения 17 — 21); $\lambda_{экв}=16\cdot10^{-5}$ Вт/(мм·град) — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу, включающий воздушные прослойки.

Обмотка фазного ротора. Тепловой расчет для определения превышения температуры фазного ротора проводят в такой последовательности.

Потери в обмотке ротора при максимальной допускаемой температуре (Вт)	$P'_{м2}=m_1(I''_2)^2m'_т r''_2$	(6.403)
Условная наружная поверхность охлаждения активной части ротора (мм²)	$S_{п2}=\pi D_{н2}l_2$	(6.404)
Условный периметр поперечного сечения полуоткрытого паза (мм)	$П_2=2(h_{п2}+b_{п2})$	(6.405)
Условная поверхность охлаждения пазов и лобовых частей обмотки (мм²)	$S_{и.п2}=z_2П_2l_2$ $S_{л2}=4\pi D_{н2}l_{в2}$	(6.406) (6.407)
Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки ротора, отнесенных к наружной поверхности охлаждения активной части ротора (Вт/мм²)	$p_{п2}=P'_{м2}(2l/l_{ср2})/S_{п2}$	(6.408)
То же, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$p_{и.п2}=P'_{м2}(2l_2/l_{ср2})/S_{и.п2}$	(6.409)
То же, от потерь в лобовых частях обмотки ротора, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки	$P_{л2}=P'_{м2}(2l_{л2}/l_{ср2})/S_{л2}$	(6.410)
Превышение температуры наружной поверхности активной части ротора над температурой воздуха внутри машины (°С)	$\Delta t_{п2}=P_{п2}/\alpha_2$	(6.411)
Перепад температуры в изоляции проводов и пазов (°С)	$\Delta t_{и.п2}=P_{и.п2}b_{и2}/\lambda_{экв}$	(6.412)
Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя (°С)	$\Delta t_{л2}=P_{л2}/\alpha_2$	(6.413)
Перепад температуры в изоляции проводов и катушек лобовых частей обмотки (°С)	$\Delta t_{и\,л2}=P_{л2}b_{и\,л2}/\lambda_{экв}$	(6.414)

Среднее превышение температуры обмотки:		
над температурой воздуха внутри двигателя	$\Delta t'_2 = (\Delta t_{п2} + \Delta t_{и.п2}) 2l_2/l_{ср2} + (\Delta t_{л2} + \Delta t_{и.л2}) 2l_л/l_{ср2}$	(6.415)
над температурой наружного воздуха соответственно (°С)	$\Delta t_2 = \Delta t'_2 + \Delta t_в$	(6.416)

Здесь α_2 — коэффициент теплоотдачи поверхности ротора (рис. 6.28); $b_{и2}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу ротора (§ 6.3); $b_{и.л2}$ — односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (см. Приложение 17).

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей с радиальной вентиляцией. Рассчитывают двигатели со степенью защиты IP23

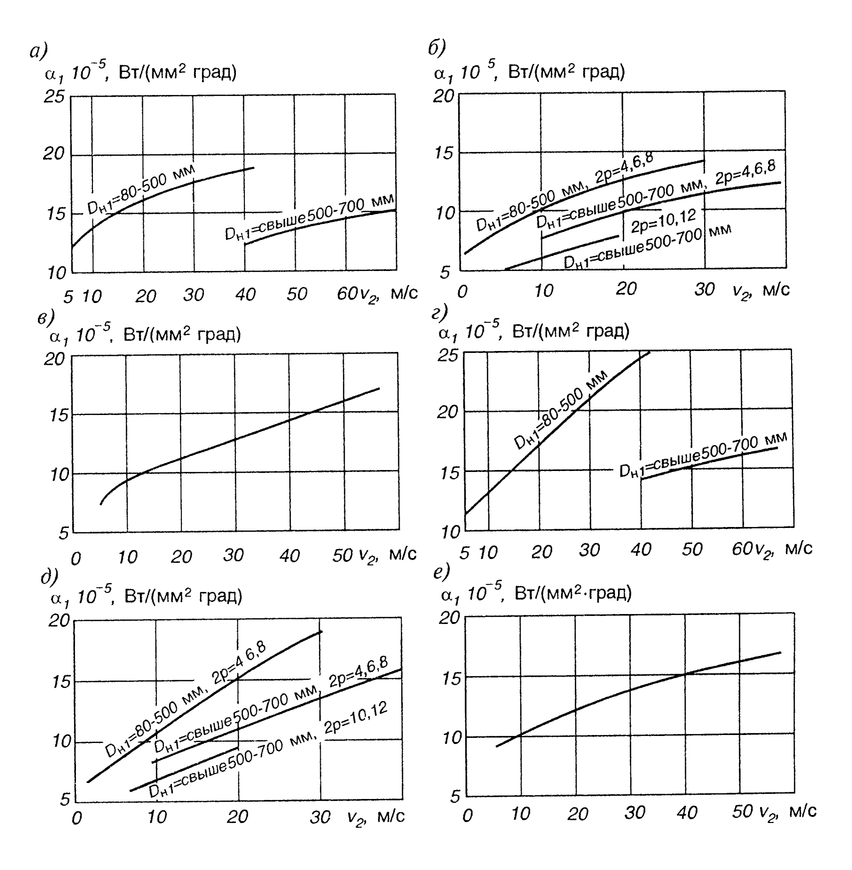


Рис. 6.26. Средние значения $\alpha_1 = f(v_2)$:

а - исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $U \leqslant 660$ В, $2p = 2$, *б* — то же, что *а*, но $2p = 4$, 6, 8, 10, 12, *в* IP44, IC0151, $U = 6000$ В, $2p = 4$, 6, 8, 10, 12, *г* — IP23, IC01, $U \leqslant 660$ В, $2p = 2$, *д* — то же, что *г*, но $2p = 4$, 6, 8, 10, 12, *е* — IP23, IC01, $U = 6000$ В, $2p = 4$, 6, 8, 10, 12

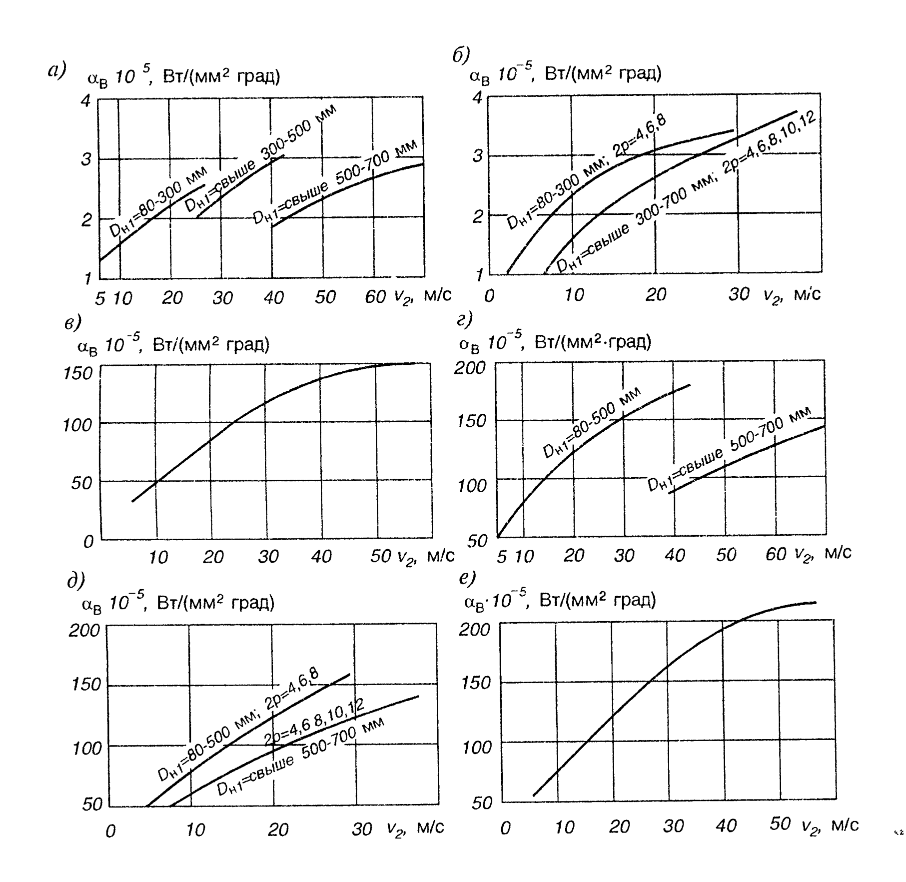
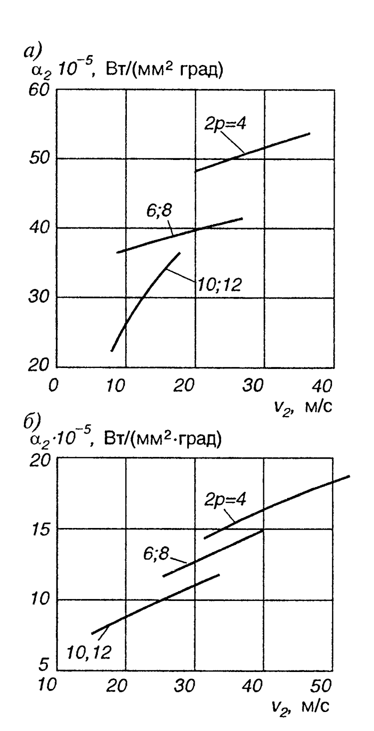


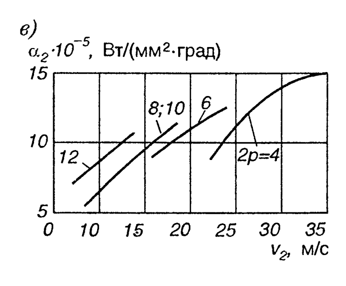
Рис. 6.27. Средние значения $\alpha_в = f(v_2)$:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $U \leqslant 660$ В, $2p=2$; *б* — то же, что *а*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *в* — IP44, IC0151, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *г* — IP23, $U \leqslant 660$ В, $2p=2$; *д* — то же, что *г*, но $2p=4$, 6, 8, 10, 12; *е* — IP23, IC01, $U=6000$ В, $2p=4$, 6, 8, 10, 12

и со способом охлаждения IC01, а также двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 в соответствии с изложенным в § 5.6. Расход воздуха $V'_в$, обеспечиваемый вентиляционным устройством, должен быть не менее необходимого расхода воздуха $V_в$. При этом следует учитывать, что эмпирические формулы для расчета $V'_в$ и H двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 действительны лишь при условии реализации в конструкции машины рекомендаций гл. 3.

Вентиляционный расчет двигателей проводят в следующей последовательности:





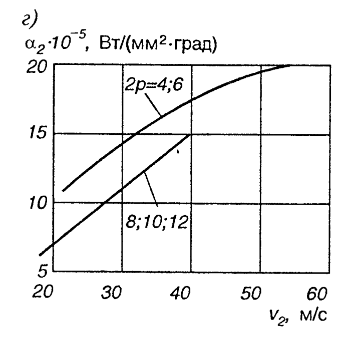


Рис. 6.28. Средние значения $\alpha_2 = f(v_2)$:

а — исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, $D_{н1} = 380-660$ мм, $U \leqslant 660$ В; *б* — IP44, IC0141, $D_{н1} = 661-990$ мм, $U = 6000$ В; *в* — IP23, IC01, $D_{н1} = 380-660$ В, $U \leqslant 660$ В; *г* — IP23, IC01, $D_{н1} = 661-990$ мм, $U = 6000$ В

Двигатели со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01

(радиальная система вентиляции)

Необходимый расход воздуха (м³/с)	$V_в$	по (5.10)
Коэффициент, зависящий от частоты вращения n_1	k_1	по (5.22)
Расход воздуха, который может быть обеспечен радиальной вентиляцией (м³/с)	$V'_в$	по (5.21)
Напор воздуха, развиваемый при радиальной вентиляции (Па)	H	по (5.23)

Двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141

Наружный диаметр корпуса (мм)	$D_{корп}$	$2(h-h_1)$; h_1 по рис. 6.1
Коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса двигателя	k_2	по (5.25)

Необходимый расход воздуха ($м^3$/с)	$V_в$	по (5.24)
Расход воздуха, который может быть обеспечен наружным вентилятором ($м^2$/с)	$V'_в$	по (5.26)
Напор воздуха, развиваемый наружным вентилятором (Па)	H	по (5.27)

В результате расчета следует убедиться, что удовлетворяется неравенство $V_в > V'_в$. Иначе потребуется изменить элементы конструкции двигателя с целью увеличения $V'_в$ до определенного значения.

6.13. Масса двигателя и динамический момент инерции ротора

Важными техническими показателями асинхронного двигателя являются его масса и динамический момент инерции ротора. Значение последнего необходимо для расчета времени разгона или остановки электродвигателя. Его точное значение может быть определено расчетом динамических моментов инерции отдельных деталей ротора. Приближенное значение динамического момента инерции короткозамкнутого ротора (кг·$м^2$)

$$J_{и.д} = (0{,}55 \div 0{,}65) D^4_{н2} l_2 \cdot 10^{-12}. \qquad (6.417)$$

Для фазного ротора значение динамического момента инерции, определенное по (6.417), должно быть увеличено на 5%.

До разработки чертежей на двигатель определение его массы можно выполнить по приближенным формулам в такой последовательности.

Масса изолированных проводов обмотки статора (кг): при круглом поперечном сечении	$m_{м1} = (7{,}55 + 1{,}35(d'/d)^2) z_1 \cdot (N_{п1}/2) \times l_{ср1} c s \cdot 10^{-6}$	(6.418)
при прямоугольном поперечном сечении	$m_{м1} = (7{,}55 + 1{,}35(s'/s)) z_1 \cdot (N_{п1}/2) \times l_{ср1} c s \cdot 10^{-6}$	(6.419)
Масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой или сварной клеткой (кг)	$m_{ал2} = 2{,}7(z_2 s_{ст} l_2 + 2\pi D_{кл.ср} \cdot s_{кл} + 1{,}1 N_л (l_л - l_{кл}) h_л b_л) \cdot 10^{-6}$	(6.420)
Масса неизолированных проводов обмотки фазного ротора (кг)	$m_{м2} = 8{,}9 z_2 (N_{п2}/2) l_{ср2} s \; 10^{-6}$	(6.421)
Масса стали сердечников статора и ротора (кг)	$m_{c\Sigma} = 7{,}8 \; l_1 k_c (0{,}785(D^2_{н1} - D^2_2) - z_1 s_{п1} - z_2 s_{п2} - (\pi d^2_{к2}/4) n_{к2}) \cdot 10^{-6}$	(6.422)

Масса изоляции статора (кг):		
при трапецеидальных полузакрытых пазах	$m_{и1}=1,35(l_1+20)(2h_{п1}+3b_п)b_{и1}z_1\cdot 10^{-6}$	(6.423)
при прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах	$m_{и1}=1,35z_1((l_1+20)(2b_{и1}h_{п1}+ +2h_{и1}b_{п1})+l_{л1}(2b_{и.л1}h_{п1}+h_{и.л1}b_{п1})\cdot 10^{-6}$	(6.424)
Масса изоляции фазного ротора (кг)	$m_{и2}=1,35z_2((l_2+20)(2b_{и2}h_{п2}+h_{и2}b_{п2})+ +l_{л2}(2b_{и.л2}h_{п2}+h_{и.л2}b_{п2}))\cdot 10^{-6}$	(6.425)
Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP44 (кг):		
$h\leqslant 200$ мм, станина и щиты из алюминиевого сплава, ротор короткозамкнутый;	$m_к=((0,21\div 0,28)D^2{}_{н1}l_1+ +(2,2\div 3)D^3{}_{н1})\cdot 10^{-6}$	(6.426)
$h\leqslant 400$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;	$m_к=((0,55\div 0,75)D^2{}_{н1}l_1+ +(2,3\div 3,1)D^3{}_{н1})\cdot 10^{-6}$	(6.427)
то же, ротор фазный;	$m_к=((0,55\div 0,75)D^2{}_{н1}l_1+ +(2,8\div 3,8)D^3{}_{н1})\cdot 10^{-6}$	(6.428)
$h\geqslant 400$ мм, сварное исполнение с распределенным трубчатым охладителем, ротор короткозамкнутый;	$m_к=(1,8\div 2,5)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(130\div 170)D^{1,3}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.429)
то же, ротор фазный	$m_к=(1,8\div 2,5)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(150\div 210)D^{1,3}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.430)
Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP23 (кг):		
$h\leqslant 250$ мм, станина и щиты из алюминиевого сплава, ротор короткозамкнутый;	$m_к=((0,9\div 1,2)D^2{}_{н1}l_1+ +(1,8\div 2,5)D^3{}_{н1})\cdot 10^{-6}$	(6.431)
$h\leqslant 355$ мм, сварное исполнение, ротор короткозамкнутый;	$m_к=(0,9\div 1,2)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(10\div 15)D^{1,6}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.432)
то же, ротор фазный;	$m_к=(0,9\div 1,2)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(12\div 16)D^{1,6}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.433)
$h\geqslant 400$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;	$m_к=(1,9\div 2,5)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(13\div 17)D^{1,6}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.434)
то же, ротор фазный	$m_к=(1,9\div 2,5)D^2{}_{н1}l_1\cdot 10^{-6}+ +(14\div 19)D^{1,6}{}_{н1}\cdot 10^{-3}$	(6.435)
Масса двигателя с короткозамкнутым ротором (кг)	$m_{дв}=m_{м1}+m_{ал2}+m_{с\Sigma}+m_{и1}+m_к$	(6.436)
то же, с фазным ротором	$m_{дв}=m_{м1}+m_{м2}+m_{с\Sigma}+m_{и1}+m_{и2}+m_к$	(6.437)

Здесь $S'=(a+\Delta_{\text{и}})(b+\Delta_{\text{и}})$; $b_{\text{п}}=0,5(b_1+b_2)$ — средняя ширина паза; $b_{\text{и}1}$, $2b_{\text{и}1}$ — из § 6.3; $2b_{\text{и}2}$ — из § 6.5; $2b_{\text{и.л}1}$ и $2b_{\text{и.л}2}$ — двусторонняя толщина изоляции по ширине в лобовой части обмотки статора из Приложений 19 и 21, а фазного ротора — из Приложения 17; $h_{\text{и}1}$ — из § 6.3; $h_{\text{и}2}$ — из § 6.5, $h_{\text{и.л}1}$ и $h_{\text{и.л}2}$ — двусторонняя толщина изоляции по высоте лобовой части обмотки статора; $h_{\text{и.л}1}=2b_{\text{и.л}1}$; $h_{\text{и.л}2}=2b_{\text{и.л}2}$; $N_{\text{л}}$, $l_{\text{л}}$, $h_{\text{л}}$ из § 3.2; $S_{\text{п}1}$, $S_{\text{п}2}$ для полузакрытых пазов — из § 6.3 и 6.4, а для прямоугольных пазов полуоткрытой и открытой формы $S_{\text{п}1}=b_{\text{п}1}h_{\text{п}1}$; $S_{\text{п}2}=b_{\text{п}2}h_{\text{п}2}$.

Для сравнения основных технических показателей спроектированных электродвигателей с показателями аналогичных отечественных электродвигателей можно воспользоваться данными о массе, динамическом моменте инерции, энергетических и других показателях этих электродвигателей, приведенными в каталогах.

6.14. Механический расчет вала

Расчет вала на жесткость. Сила тяжести (Н) сердечника ротора с обмоткой и участком вала по длине сердечника асинхронного двигателя

$$G'_2 \approx 64 D^2_{\text{н}2} l_2 10^{-6}. \tag{6.438}$$

Для расчета прогиба вала составляют эскиз вала с размерами (рис. 6.29). Для этого должна быть разработана предварительно конструкция машины. Вал разбивают на три участка; *a*, *b* и *c*.

Под воздействием силы тяжести прогиб вала посередине сердечника (мм)

$$f_{\text{т}}=G'_2(a^2 S_b+b^2 S_a)\cdot 10^6/(3El^2), \tag{6.439}$$

где $E=2,06\cdot 10^{11}$ Па — модуль упругости стали; *a*, *b* и *l* — из рис. 6.29, мм.

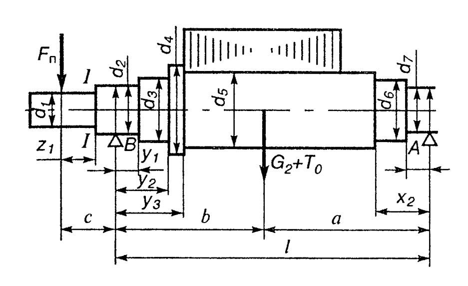


Рис. 6.29. Эскиз вала к механическому расчету

Значения S_a и S_b определяют в соответствии с размерами *d*, *x* и *y*, указанными на рисунке и с расположением расчетных данных по форме, указанной в табл. 6.25. В этой таблице d_i и J_i — диаметр и экваториальный момент инерции рассматриваемого участка вала; x_i и y_i — расстояния, соответствующие диаметру вала d_i.

Участок b

d_i, мм	J_i, мм^4	y_i, мм	y^3_i, мм^3	$(y^3_i - y^3_{i-1})$, мм^3	$(y^3_i - y^3_{i-1})/J_i$, мм$^{-1}$	y_i^2, мм^3	$(y^2_i - y^2_{i-1})$, мм^2	$(y^2_i - y^2_{i-1})/J_i$, мм$^{-2}$
75	$155 \cdot 10^4$	45	$91 \cdot 10^3$	$91 \cdot 10^3$	0,059	$2{,}02 \cdot 10^3$	$2{,}02 \cdot 10^3$	0,00130
87	$281 \cdot 10^4$	125	$1953 \cdot 10^3$	$1862 \cdot 10^3$	0,663	$15{,}62 \cdot 10^3$	$13{,}6 \cdot 10^3$	0,00484
95	$397 \cdot 10^4$	165	$4492 \cdot 10^3$	$2539 \cdot 10^3$	0,639	$27{,}22 \cdot 10^3$	$11{,}6 \cdot 10^3$	0,00292
90	$322 \cdot 10^4$	330	$35937 \cdot 10^3$	$31445 \cdot 10^3$	9,766	$108{,}9 \cdot 10^3$	$81{,}7 \cdot 10^3$	0,02537
$S_b = 11{,}128$						$S_0 = 0{,}03443$		

Участок a

d_i, мм	J_i, мм^4	x_i, мм	x^3_i, мм^3	$(x^3_i - x^3_{i-1})$, мм^3	$(x^3_i - x^3_{i-1})/J_i$, мм$^{-1}$
75	$155 \cdot 10^4$	45	$91 \cdot 10^3$	$91 \cdot 10^3$	0,059
87	$281 \cdot 10^4$	125	$1953 \cdot 10^3$	$1862 \cdot 10^3$	0,663
—	—	—	—	—	—
90	$322 \cdot 10^4$	377	$50653 \cdot 10^3$	$48700 \cdot 10^3$	15,124
$S_a = 15{,}846$					

Экваториальный момент инерции вала (мм)

$$J_i = \pi d_i^4/64. \tag{6.440}$$

При работе машины возникает поперечная сила, вызываемая передачей через упругую муфту или клиноременной передачей и приложенная к выступающему концу вала. Эта сила от передачи (Н)

$$F_п = (k_п M_2/r) \cdot 10^3, \tag{6.441}$$

где $k_п = 0{,}3$ — при передаче упругой муфтой (учитывая неоднородную плотность втулок) и $k_п = 1{,}8$ — при передаче клиновыми ремнями (размеры упругих муфт принимают по Приложению 23, а клиноременных шкивов — по Приложению 24), r — радиус окружности расположения пальцев упругой муфты или окружности шкива, мм.

От поперечной силы передачи прогиб вала посередине сердечника (мм)

$$f_п = F_п c\,[(1{,}5 \cdot l \cdot S_0 - S_b)a + S_a] \cdot 10^6/(3EI^2), \qquad (6.442)$$

где $S_0 = \Sigma(y_i^2 - y_{i-1}^2)/J_i$ (рис. 3.1, табл. 6.24).

Возникающий из-за неравномерности воздушного зазора, а также из-за прогиба под действием сил G'_2 и $F_п$ начальный расчетный эксцентриситет сердечника ротора или якоря (мм)

$$e_0 = k\delta + f_т + f_п, \qquad (6.443)$$

где $k=0{,}1$, при $\delta \geqslant 0{,}5$ мм; $k=0{,}15$ при $\delta < 0{,}5$ мм.

Эксцентриситет сердечника ротора или якоря вызывает неравенство магнитных потоков полюсов, а именно увеличение потоков в зоне меньших воздушных зазоров. При смещении сердечника на e_0 сила одностороннего магнитного притяжения (Н)

$$T_0 = 0{,}15 D_{н2} l_2 e_0/\delta; \qquad (6.444)$$

при $2p=2$ вместо 0,15 в (6.444) подставляют 0,1.

Дополнительный прогиб от силы T_0 (мм):

$$f_0 = f_т T_0/G'_2. \qquad (6.445)$$

Увеличение прогиба на f_0 вызовет усиление силы магнитного притяжения, а следовательно, и дальнейшее увеличение прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся. Под действием сил магнитного притяжения установившийся прогиб вала (мм)

$$f_м = f_0/(1 - f_0/e_0). \qquad (6.446)$$

Когда отдельные составляющие прогиба суммируются (в худшем случае), результирующий прогиб вала (мм)

$$f = f_т + f_п + f_м. \qquad (6.447)$$

Величина f должна составлять у асинхронных двигателей не более 10% от δ; при превышении этого значения увеличивают диаметр вала в средней части с повторением расчета.

Определение критической частоты вращения. Первая критическая частота вращения машины может рассматриваться в качестве характеристики изгибной жесткости вала.

Прогиб (мм) от силы тяжести
упругой полумуфты

$$f_с = f_п F_с/(2F_п); \qquad (6.448)$$

шкива

$$f_с = f_п F_с / F_п, \tag{6.449}$$

где $F_с = 9{,}81m/2$ — сила тяжести соединительного устройства (упругой полумуфты или шкива); m — масса упругой муфты или шкива (см. Приложения 23 и 24), кг.

С учетом влияния силы тяжести соединительного устройства первая критическая частота вращения (об/мин)

$$n_{кр} \approx 950\,[(1 - f_0/e_0)/(f_т + f_с)]^{1/2}. \tag{6.450}$$

Значение $n_{кр}$ должно превышать максимальную рабочую частоту вращения не менее чем на 30%.

Расчет вала на прочность. Расчет ведется исходя из теории максимальных касательных напряжений. Вал рассчитывают на участке c в наиболее нагруженном сечении $1 - 1$ выступающего конца вала; в расчете прочности момент сопротивления определяют по диаметру выступающего конца вала, уменьшенному на высоту шпоночной канавки. На участке a напряжения будут ниже вследствие унификации диаметров вала под подшипниками. В рассматриваемом сечении вала на участке c изгибающий момент (Н · м)

$$M_{и(с)} = k(F_п + F_с)z_1 \cdot 10^{-3}, \tag{6.451}$$

где $k = 2$ — принимаемый коэффициент перегрузки.

При соединении машины упругой муфтой отрезки z_1 и c отсчитывают от середины втулки муфты. В этом случае (см. Приложение 23)

$$z_1 \approx L/2 + l_1/2. \tag{6.452}$$

Соответственно определяют и другие размеры на участке c. При соединении машины шкивом z_1 и c отсчитывают от середины длины выступающего конца вала.

Момент кручения (Н · м)

$$M_к = kM_2; \tag{6.453}$$

момент сопротивления при изгибе (мм^3)

$$\omega = 0{,}1d^3_i. \tag{6.454}$$

При совместном действии изгиба и кручения приведенное напряжение (Па)

$$\sigma_{пр} = (M^2_и + M^2_к)^{1/2} \cdot 10^9/\omega. \tag{6.455}$$

Значение $\sigma_{пр}$ ни в одном сечении вала не должно превышать $0{,}7\sigma_т$, где $\sigma_т$ — предел текучести качественной стали на растяжение:

Марка стали	30	35	40	45	50
$\sigma_т$, Па	$230\cdot10^6$	$270\cdot10^6$	$310\cdot10^6$	$350\cdot10^6$	$390\cdot10^6$

6.15. Расчет подшипников

Расчет подшипников качения. При расчете подшипников качения определяют их типоразмеры, которые обеспечивают необходимый срок службы при заданных нагрузке и частоте вращения. Условные обозначения и размеры подшипников, а также другие их параметры приведены в Приложении 22.

Наибольшая радиальная нагрузка (Н):
на подшипник A

$$R_A=(G'_2+T_0)b/l+F_п c/l; \tag{6.456}$$

на подшипник B

$$R_B=(G'_2+T_0)a/l+F_п(l+c)/l. \tag{6.457}$$

Динамическая приведенная нагрузка (Н):
для шарикоподшипника однорядного радиального

$$Q=k_\sigma R \text{ при } A/R\leqslant e; \tag{6.458}$$

$$Q=k_\sigma(0{,}56R+YA) \text{ при } A/R>e; \tag{6.459}$$

для роликоподшипника радиального с короткими цилиндрическими роликами — по (6.458);
для шарикоподшипника радиально-упорного сдвоенного

$$Q=k_\sigma(R+0{,}92A) \text{ при } A/R\leqslant 0{,}68; \tag{6.460}$$

$$Q=k_\sigma(0{,}67R+1{,}41A) \text{ при } A/R>0{,}68. \tag{6.461}$$

Здесь k_σ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки машины; при режиме работы с умеренными толчками и кратковременной перегрузкой до 150% от номинальной нагрузки — $k_\sigma=1{,}5$; A — аксиальная нагрузка, Н; Y — коэффициент приведения аксиальной нагрузки к радиальной.

Значения e и Y однорядных радиальных подшипников в зависимости от A/C_0 [где C_0 — статическая грузоподъемность (Н), предварительно принятого типа подшипника (из Приложения 22)] определяют по следующим данным:

A/C_0	0,014	0,028	0,056	0,084	0,11	0,17	0,28	0,42	0,56
e	0,19	0,22	0,26	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,44
Y	2,30	1,99	1,71	1,55	1,45	1,31	1,15	1,04	1,00

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию. При $A/C_0 < 0{,}19$ приведенная нагрузка $Q = R$. При отсутствии аксиальной нагрузки и горизонтальном расположении вала осевое магнитное притяжение в расчете не учитывается, а при вертикальном расположении вала

$$A = 1{,}15G'_2 + F_c + 0{,}1R. \tag{6.462}$$

Необходимая динамическая грузоподъемность (Н):
шарикоподшипника

$$C = (Q/25{,}6)(\mathrm{Ln})^{1/3}, \tag{6.463}$$

роликоподшипника

$$C = (Q/18{,}5)(\mathrm{Ln})^{0,3}, \tag{6.464}$$

где L — расчетный срок службы подшипника, ч (обычно принимают 12 000 ч); n — наибольшая рабочая частота вращения машины, об/мин.

Из Приложения 22 выбирают подшипник соответствующей серии, у которого внутренний диаметр равен диаметру шейки вала, а динамическая грузоподъемность — не менее значения, вычисленного по (6.463) или (6.464).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ДИАМЕТРЫ И ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КРУГЛЫХ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ

а) Провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК, ПСДТ, ПСДКТ

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм²	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки				Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²	Диаметр (мм) изолированного провода марки			
		ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ			ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ
0,06	0,00283	0,080	—	—	—	0,35	0,0962	0,390	0,59	0,54	0,50
0,07	0,00385	0,090	—	—	—	0,38	0,1134	0,420	0,62	0,57	0,53
0,08	0,00503	0,100	—	—	—	0,41	0,1320	0,450	0,65	0,60	0,56
0,09	0,00636	0,110	—	—	—	0,44	0,1521	0,480	0,68	0,63	0,59
0,10	0,00785	0,122	—	—	—	0,47	0,1735	0,510	0,71	0,66	0,62
0,11	0,00950	0,132	—	—	—	0,49	0,1886	0,530	0,73	0,68	0,64
0,12	0,01131	0,142	—	—	—	0,51	0,2040	0,565	0,77	0,71	0,68
0,13	0,01327	0,152	—	—	—	0,53	0,2210	0,585	0,79	0,73	0,70
0,14	0,01539	0,162	—	—	—	0,55	0,2380	0,605	0,81	0,75	0,72
0,15	0,01767	0,180	—	—	—	0,57	0,2550	0,625	0,83	0,77	0,74
0,16	0,0201	0,190	—	—	—	0,59	0,2730	0,645	0,85	0,79	0,76
0,17	0,0227	0,200	—	—	—	0,62	0,3020	0,675	0,88	0,82	0,79
0,18	0,0255	0,210	—	—	—	0,64	0,3220	0,700	0,90	0,84	0,81
0,19	0,0284	0,220	—	—	—	0,67	0,3530	0,730	0,93	0,87	0,84
0,20	0,0314	0,230	—	—	—	0,69	0,3740	0,750	0,95	0,89	0,86
0,21	0,0346	0,240	—	—	—	0,72	0,4070	0,780	0,99	0,94	0,90
0,23	0,0415	0,265	—	—	—	0,74	0,4300	0,805	1,01	0,96	0,92
0,25	0,0491	0,285	—	—	—	0,77	0,4660	0,835	1,04	0,99	0,95
0,27	0,0573	0,305	—	—	—	0,80	0,5030	0,865	1,07	1,02	0,98
0,29	0,0661	0,325	—	—	—	0,83	0,5410	0,895	1,10	1,05	1,01
0,31	0,0755	0,345	0,55	0,50	0,46	0,86	0,5810	0,925	1,13	1,08	1,04
0,33	0,0855	0,365	0,57	0,52	0,48	0,90	0,6360	0,965	1,17	1,12	1,08

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм^2	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр (мм) изолированного провода марки				Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр (мм) изолированного провода марки			
		ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ			ПЭТВ ПЭТ-155	ПСД ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ
0,93	0,6790	0,995	1,20	1,15	1,11	1,81	2,570	1,905	2,10	2,06	2,05
0,96	0,7240	1,025	1,23	1,18	1,14	1,88	2,780	1,975	2,17	2,13	2,12
1,00	0,785	1,080	1,29	1,23	1,20	1,95	2,990	2,045	2,24	2,20	2,19
1,04	0,849	1,120	1,33	1,27	1,24	2,02	3,200	2,115	2,32	2,28	2,27
1,08	0,916	1,160	1,37	1,31	1,28	2,10	3,460	2,200	2,40	2,36	2,35
1,12	0,985	1,200	1,41	1,35	1,32	2,26	4,010	2,360	2,62	—	—
1,16	1,057	1,240	1,45	1,39	1,36	2,44	4,680	2,540	2,80	—	—
1,20	1,131	1,280	1,49	1,43	1,40	2,63	5,430	—	2,99	—	—
1,25	1,227	1,330	1,54	1,48	1,45	2,83	6,290	—	3,19	—	—
1,30	1,327	1,385	1,59	1,53	1,50	3,05	7,310	—	3,42	—	—
1,35	1,431	1,435	1,64	1,58	1,55	3,28	8,450	—	3,65	—	—
1,40	1,539	1,485	1,69	1,63	1,60	3,53	9,790	—	3,90	—	—
1,45	1,651	1,535	1,74	1,68	1,65	3,80	11,34	—	4,17	—	—
1,50	1,767	1,585	1,79	1,73	1,70	4,10	13,20	—	4,48	—	—
1,56	1,911	1,645	1,85	1,79	1,76	4,50	15,90	—	4,88	—	—
1,62	2,060	1,705	1,91	1,87	1,86	4,80	18,10	—	5,18	—	—
1,68	2,220	1,765	1,97	1,93	1,92	5,20	21,24	—	5,28	—	—
1,74	2,380	1,825	2,03	1,99	1,98						

б) Провода марки ПЭТ-200

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Диаметр изолированного провода марки ПЭТ-200, мм
0,50	0,196	0,552	1,25	1,227	1,325
0,56	0,246	0,612	1,32	1,368	1,395
0,63	0,312	0,690	1,40	1,539	1,485
0,71	0,396	0,770	1,50	1,767	1,585
0,75	0,442	0,810	1,60	2,011	1,685
0,80	0,503	0,865	1,70	2,270	1,785
0,85	0,567	0,915	1,80	2,545	1,895
0,90	0,636	0,965	1,90	2,835	1,995
0,95	0,709	1,015	2,00	3,142	2,095
1,00	0,785	1,080	2,12	3,530	2,215
1,06	0,882	1,135	2,24	3,941	2,345
1,12	0,985	1,195	2,36	4,374	2,465
1,18	1,094	1,255	2,50	4,909	2,605

Примечание. Диаметры изолированных проводов вычислены с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщин.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РАЗМЕРЫ И ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ, ЛЕНТ И ШИН МЕДНЫХ

Номинальный размер по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки a, мм^2																			
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,0	2,12	2,24	2,36
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	1,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—	—	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	6,638	—	—	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315	6,693	—
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—	7,141	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163	7,589	7,829
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—	8,037	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	8,597	8,891
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—	9,157	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,551	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	9,717	10,07
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—	10,28	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,566	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—	11,51	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18	12,67
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	13,08	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,75	14,32
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,51	—	11,70	—	13,04	—	14,65	—
7,10	—	—	6,16	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	16,44	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,255	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56	18,33

8.50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—	18,68	—
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80	20,69
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	15,99	—	16,74	—	18,64	—	20,92	—
10,00	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—	23,38	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,88
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—	26,07	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,95

Номинальный размер по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки a, мм^2														
	2,50	2,65	2,80	0,0	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
3,55	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	12,70	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	18,20	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	21,95	23,30	24,65	23,45	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	23,20	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,0	24,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14

Номинальный размер по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки a, мм^2														
	2,50	2,65	2,80	0,0	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
10,6	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	58,14	—	65,22
12,5	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46.02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Номинальный размер по большей стороне b, мм	Расчетные сечения лент (мм^2) при следующих номинальных размерах лент по меньшей стороне a, мм																	
	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,81	1,95	2,00	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63	2,83	3,00	3,28	3,53
11,6	14,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	15,3	16,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	16,5	17,8	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	17,9	19,2	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	19,2	20,7	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	—	—	23,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	20,7	22,3	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	22,2	23,9	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	24,0	25,9	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40,6	—	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	—	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22,0	27,2	29,3	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25,0	30,9	33,4	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	32,5	35,1	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,7		—	—
28,0	34,7	37,4	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—	57,9	62,2	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30,0	37,2	40,1	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	96,1	—
32,0	39,7	42,8	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35,0	43,4	46,9	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6	78,0	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40,0	49,7	53,6	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5

45,0	55,9	60,4	64,8	—	69.7	75,0	80,8	86,9	—	93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	114,4	—	122,1	—	—	—	—
50,0	62,2	67,1	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55,0	—	—	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6	123,2	132,9	—	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60,0	74,7	80,6	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65,0	—	—	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70,0	—	—	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
80,0	—	—	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90,0	—	—	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100,0	—	—	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Номинальный размер шин по большей стороне b, мм	Расчетные сечения шин (мм^2) при следующих номинальных размерах шин по меньшей стороне a, мм									
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	198,1
25	—	—	—	—	—	—	—	198,1	223,1	248,1
30	—	—	—	—	179,1	193,1	208,1	238,1	268,1	298,1
32	—	—	—	—	191,1	206,1	—	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	225,6	—	278,1	—	348,1
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	258,1	278,1	318,1	358,1	398,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	290,6	313,1	358,1	403,1	448,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	323,1	348,1	398,1	448,1	498,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	355,6	383,1	438,1	493,1	548,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	388,1	418,1	478,1	538,1	598,1
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	453,1	—	583,1	648,1
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	558,1	628,1	698,1
75	—	—	—	—	—	—	—	598,1	—	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	558,1	638,1	—	798,1
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	628,1	718,1	—	898,1
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	698,1	798,1	—	998,1
120	—	—	—	—	—	—	—	958,1	—	1198,1

Примечание. Прямоугольную проволоку используют для изолированных проводов

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
ДВУСТОРОННЯЯ ТОЛЩИНА ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Марка провода	Номинальные размеры проводов по меньшей стороне, мм			Номинальные размеры проводов по большей стороне, мм						
	от 0,90 до 2,00	от 2,10 до 3,80	от 4,0 до 5,6	от 2,10 до 2,50	от 2,63 до 3,35	от 3,53 до 4,50	от 4,70 до 5,60	от 5,93 до 7,10	от 7,40 до 8,00	от 8,50 до 12,50
ПСДКТ	0,22	0,22	—	0,26	0,28	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32
ПСДК и ПСД	0,27	0,33	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48

Примечание Двусторонняя толщина изоляции проводов марок ПЭТВП, ПЭТП-155 и ПЭТП-200—0,15 мм.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
РАЗМЕРЫ И ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ШИН ПРЯМОУГОЛЬНЫХ (ПРЕССОВАННЫХ) ИЗ АЛЮМИНИЯ

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Площадь поперечного сечения шины (мм^2) при номинальном размере по большей стороне, мм			
	30	40	50	60
4	120	160	200	240
5	150	200	250	300
6	180	240	300	360

Алюминий марки АДО с удельным сопротивлением не более 0,029 Ом · мм/м при 20° С, плотность материала 2,71 г/см^3.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
ОСНОВНАЯ ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ. СТАЛЬ 2013

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,0	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,9
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,8
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

ПРИЛОЖЕНИЕ 6
ОСНОВНАЯ ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ. СТАЛЬ 2312

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75
0,5	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	434	430	480	521	557	597	641	689
2,1	740	800	860	920	980	1050	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
ОСНОВНАЯ ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ. СТАЛЬ 2411

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,6	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,87	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,85	5,00	5,40
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	35,4	38,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100	105	110	115	120	125	131	137	143	149
1,8	156	162	168	175	183	191	200	209	219	229
1,9	239	250	262	274	287	287	320	360	420	500
2,0	590	680	770	860	950	1040	1130	1220	1310	1400
2,1	1490	1580	1670	1760	1850	1940	2030	2120	2210	2300
2,2	2390	2480	2570	2660	2750	2840	2930	3020	3110	3200
2,3	3290	3380	3470	3560	3650	3740	3830	3920	4010	4100
2,4	4190	4280	4370	4460	4550	4640	4730	4820	4910	5000

ПРИЛОЖЕНИЕ 8
ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2013

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,5
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,4	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	2,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,36	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,4	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1
1,9	20,7	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	26,4	27,6	28,9	30,2

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
2,0	31,5	33,2	35,0	36,8	38,6	40,4	42,6	44,8	47,0	49,2
2,1	51,4	54,4	57,4	60,5	63,6	66,7	71,2	75,7	80,2	84,7
2,2	89,2	94,3	99,4	104,6	109,8	115	120	126	132	138
2,2	144	151	158	165	172	180	188	196	205	214

ПРИЛОЖЕНИЕ 9
ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2312

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79
1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10,0	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,6	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19,0	19,4	20,0	20,7	21,4	22,2	23,0	23,8	25,0	26,0
1,8	27,0	28,0	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40,0
1,9	41,6	43,6	46,0	48,0	50,3	53,3	54,3	57,9	61,3	64,2
2,0	67,5	71,7	74,0	77,9	81,5	85,2	90,0	94,0	97,5	102
2,1	106	110	115	121	126	130	135	141	147	154
2,2	159	165	173	178	185	191	196	203	211	220
2,3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

ПРИЛОЖЕНИЕ 10
КРИВАЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2411

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
0,5	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
0,6	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04
0,7	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,8	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40
0,9	1,42	1,44	1,47	1,49	1,51	1,55	1,58	1,60	1,63	1,65
1,0	1,68	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88	1,91	1,96	2,00
1,1	2,04	2,07	2,12	2,16	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47
1,2	2,54	2,59	2,65	2,72	2,77	2,84	2,91	2,98	3,07	3,16
1,3	3,23	3,33	3,41	3,51	3,61	3,72	3,83	3,94	4,04	4,21
1,4	4,25	4,32	4,61	4,80	4,97	5,18	5,37	5,54	5,73	5,96
1,5	6,22	6,44	6,73	7,00	7,28	7,56	7,95	8,28	8,59	8,90
1,6	9,32	9,76	10,2	10,7	11,3	11,8	12,6	13,5	14,4	15,2
1,7	16,3	17,4	18,7	20,2	21,3	23,0	24,5	26,3	28,3	30,4
1,8	31,9	34,1	35,9	38,3	41,0	44,0	46,0	48,0	51,0	54,0
1,9	57,0	59,0	63,0	66,0	69,0	72,0	77,0	81,0	83,0	87,0
2,0	92,0	97,0	100	105	109	114	120	127	131	137
2,1	142	150	158	165	172	179	187	198	206	216
2,2	226	237	246	261	269	287	300	314	332	354
2,3	376	399	422	446	470	495	520	546	572	598

ПРИЛОЖЕНИЕ 11
ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ СПИНКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2013

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62
0,5	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78
0,6	0,80	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
0,7	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21
0,8	1,24	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,40	1,43	1,46	1,49
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,81
1,0	1,85	1,88	1,91	1,95	1,99	2,03	2,06	2,09	2,13	2,17
1,1	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	38,0	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	60,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,0	90,0	97,0

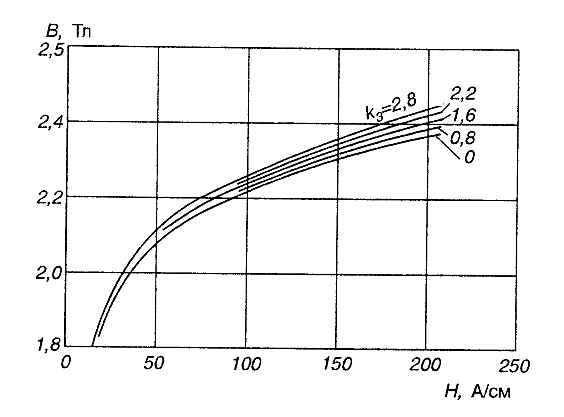
ПРИЛОЖЕНИЕ 12
ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ СПИНКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2312

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80	1,83	1,86	1,90
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,4	43,1	44,9	46,7	48,5	50,4
1,9	52,2	56,0	60,0	64,0	69,0	74,0	79,0	85,0	91,0	97,0
2,0	104	111	118	125	133	141	149	158	167	176

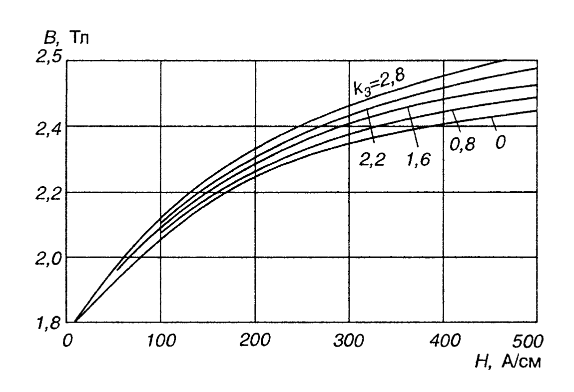
ПРИЛОЖЕНИЕ 13
ТАБЛИЦА НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ СПИНКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СТАЛЬ 2411

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,53	0,54
0,5	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,61	0,62
0,6	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71
0,7	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79
0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94
0,9	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14
1,0	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43
1,1	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,67	1,72	1,76	1,82	1,88
1,2	1,92	1,98	2,04	2,10	2,16	2,22	2,30	2,38	2,46	2,60
1,3	2,72	2,88	3,00	3,16	3,30	3,40	3,58	3,70	3,86	3,99
1,4	4,10	4,40	4,60	4,90	5,30	5,70	6,10	6,60	7,10	7,70
1,5	8,20	8,90	9,60	10,3	11,0	11,7	12,3	13,1	14,0	14,8
1,6	15,6	16,4	17,3	18,2	19,2	20,0	21,0	22,6	24,4	26,0
1,7	28,0	29,6	31,0	32,6	34,0	35,8	37,4	39,0	41,0	43,0
1,8	45,0	47,0	50,0	53,0	55,0	58,0	61,0	64,0	68,0	72,0
1,9	76,0	80,0	85,0	91,0	97,0	103	111	119	131	142
2,0	160	180	200	220	238	255	276	296	315	338

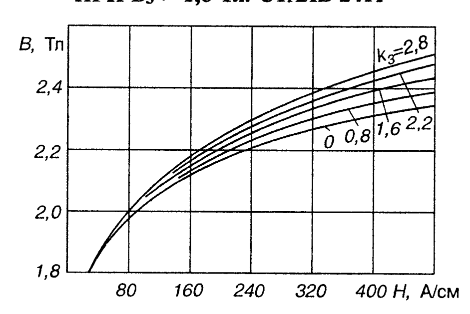
ПРИЛОЖЕНИЕ 14
КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ $B_З$ > 1,8 Тл. СТАЛЬ 2013



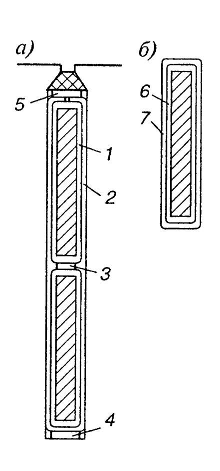
ПРИЛОЖЕНИЕ 15
КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ $B_З$ > 1,8 Тл. СТАЛЬ 2312



ПРИЛОЖЕНИЕ 16
КРИВЫЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ДЛЯ ЗУБЦОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ $B_З$ > 1,8 Тл. СТАЛЬ 2411



ПРИЛОЖЕНИЕ 17
ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТКИ ФАЗНОГО РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. НАПРЯЖЕНИЕ ДО 750 И ДО 1200 В. ПАЗЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ПОЛУЗАКРЫТЫЕ. ОБМОТКА ДВУХСЛОЙНАЯ, СТЕРЖНЕВАЯ. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ B, F, H

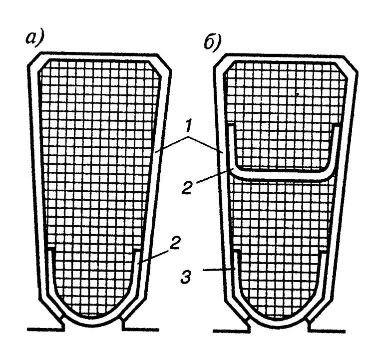


Часть обмотки	Позиция по рисунку	Материал		Количество слоев при		Толщина изоляции (мм) при			
		Наименование	Толщина, мм	750 В	Более 750 В	750 В		более 750 В	
						по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая (рис *а*)	1	Синтофолий	0,16	3,5	7,5	1,1	2,2	2,4	4,8
	2	Стеклолакоткань	0,15	1,0	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3
	3	Стеклотекстолит	0,50	1,0	1,0	—	0,5	—	0,5
	4	»	0,50	1,0	1,0	—	0,5	—	0,5
	5	»	0,50	1,0	1,0	—	0,5		0,5
	—	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,5	0,3	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу				1,7	4,5	3,0	7,1
Лобовая (рис *б*)	6	Лента стеклослюдинитовая	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,6	0,6	1,2	1,2
	7	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,8	0,8
	—	Общая толщина изоляции стержня				1,0	1,0	2,0	2,0

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Синтофолий	Синтофолий — F		Синтофолий — H
Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	ЛСП
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ934— ТП	ЛС ПЭ934— ТП	—
Пленка полиимидная	—	—	ПМ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС

Примечание При классе нагревостойкости H вместо ленты стеклослюдинитовой позиции 6 применить пленку полиимидную марки ПМ толщиной 3 x 0,05 мм

ПРИЛОЖЕНИЕ 18
ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. НАПРЯЖЕНИЕ ДО 690 В. ПАЗЫ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫЕ ПОЛУЗАКРЫТЫЕ. ОБМОТКА ОДНО- И ДВУХСЛОЙНАЯ

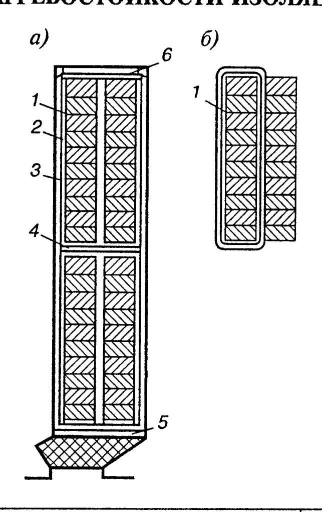


Обмотка	Высота оси вращения, мм	Позиция по рисунку	Толщина пленкостеклопласта, мм	Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
	50—80	1	0,20	1	0,20
		2	0,30	1	0,30
Однослойная (рис. *а*)	90—132	1	0,25	1	0,25
		2	0,35	1	0,35
	160	1	0,40	1	0,40
		2	0,50	1	0,50
Двухслойная (рис. *б*)	180—280	1	0,40	1	0,40
		2	0,40	1	0,40
		3	0,50	1	0,50

Примечания: 1. Марка пленкостеклопласта — Изофлекс при классе *B* и Имидофлекс — при классах *F* и *H*. 2. Прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала поз. 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. НАПРЯЖЕНИЕ ДО 690 В. ПАЗЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ПОЛУОТКРЫТЫЕ И ОТКРЫТЫЕ. ОБМОТКА ДВУХСЛОЙНАЯ, ЖЕСТКИМИ ПОЛУКАТУШКАМИ. ПРОВОД ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ *B, F, H*



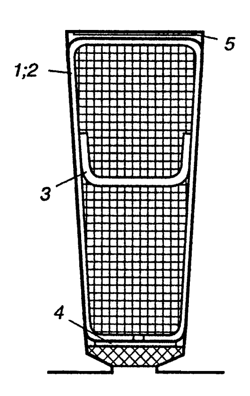
Часть обмотки	Позиция по рисунку*	Материал		Количество слоев	Толщина изоляции, мм, для пазов	
		наименование	толщина		рис. *а*	
					по ширине	по высоте
Пазовая (рис *а*)	1	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,2	0,2
	2	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	0,6	0,6
	3	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	1,1	1,1
	4	Стеклотекстолит	1,00	1,0	—	1,0
	5	То же	0,50	1,0	—	0,5
	6	»	0,50	1,0	—	0,5
	7	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	—	—
	8	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	—	—
	9	Стеклотекстолит	0,50	1,0	—	—
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,6
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)			2,2	4,5
Лобовая (рис *б*)	—	Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной 0,1 x 20 в двух местах	0,10	2,5	0,5	0,5
	1	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,1	0,1
	—	Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)	—	—	0,6	0,6

* *а* — пазовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах; *б* — лобовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах.

Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Лакотканеслюдопласт	ГИТ – ЛСБ – ЛСЛ	ГИП – ЛСП – ЛСЛ	ГИК – ЛСК – ЛСЛ
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	—
Микалента	—	—	ЛФК – ТТ

Примечание. Крайние полукатушки фаз имеют дополнительную изоляцию на стеклолакоткани при классах *B* и *F* или микаленты — при классе *H* и из ленты стеклянной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 20
ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ. НАПРЯЖЕНИЕ ДО 660 В. 2p = 10 И 12. ПАЗЫ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫЕ ПОЛУЗАКРЫТЫЕ. ОБМОТКА ДВУХСЛОЙНАЯ, ВСЫПНАЯ. ПРОВОД КРУГЛЫЙ ЭМАЛИРОВАННЫЙ. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ *B, F, H*



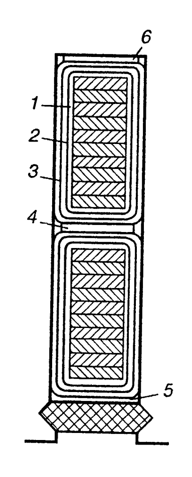
Наименование материала	Марка при классах		
	B	F	H
Пленкосинтокартон	ПСК – Л	ПСК – Ф	ПСК – Н
Лакотканеслюдопласт	ГИТ – ЛСБ ЛСЛ	ГИП – ЛСП ЛСЛ	ГИК – ЛСК ЛСЛ

Позиция по рисунку	Материал			Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм	
	наименование	толщина, мм			B	F, H
		класс B	классы F, H			
1	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
2	Электронит	0,30	0,30	1	0,30	0,30
3	Лакотканеслюдопласт	0,55	0,55	1	0,55	0,55
4	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
5		0,25	0,28	1	0,25	0,28

Примечания: 1. Поз. *1* — в сторону обмотки, поз. *2* — к стенке паза. Прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала поз. *3*.

П Р И Л О Ж Е Н И Е 21

ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. НАПРЯЖЕНИЕ ДО 6300 В. ПАЗЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ОТКРЫТЫЕ. ОБМОТКА ДВУХСЛОЙНАЯ, С ЖЕСТКИМИ КАТУШКАМИ. ПРОВОД ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ. КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ИЗОЛЯЦИИ *В, Р*



Часть обмотки	Позиции по рисунку	Материал		Количество слоев	Толщина изоляции (мм) для пазов	
		наименование и марка	толщина, мм		рис. *а*	
					по ширине	по высоте
Пазовая	1	Стеклослюдопластовая лента ЛИ — СК — ТТ	0,14	4-вполнахлеста	2,24	4,48
	2	То же, ЛИ — СКу — ТТ	0,14	1-вполнахлеста	0,56	1,12
	3	Лента стеклянная ЛЭС	0,10	1 встык	0,20	0,40
	—	Разбухание от пропитки компаундом	—	—	0,80	2,80
	4	Стеклотекстолит СТ (класс В) и СТЭФ (класс F)	2,00	1	—	2,00
	5	То же	0,50	1	—	0,50
	6	»	0,50	1	—	0,50
	7	»	0,50	1	—	—
	8	Слюдопластофолий ИФГ — Б**	0,15	4,5***	—	—
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,30	0,60
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)	—	—	4,10	12,40
Лобовая	—	Общая толщина изоляции катушки (без витковой)	—	—	3,80	4,40

* Обмотка статора асинхронного двигателя (*а*).
** При классе *F* — синтофолий *F*, толщиной 0,16 мм, 3,5 оборота.
*** С учетом усадки на 15—20 %.

П Р И Л О Ж Е Н И Е 22
ПОДШИПНИКИ КАЧЕНИЯ

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
Шарикоподшипники радиальные однорядные (ГОСТ 8338—75)							
Легкая серия							
200	10	30	9	1,0	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1,0	4700	2650	20 000
202	15	35	11	1,0	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1,0	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2,0	25 100	17 800	6300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6300
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	80	140	26	3,0	56 000	44 500	4000
237	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
Средняя серия							
300	10	35	11	1,0	6250	3750	20 000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16 000
302	15	42	13	1,5	8750	5400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6670	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	23 200	6300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3150

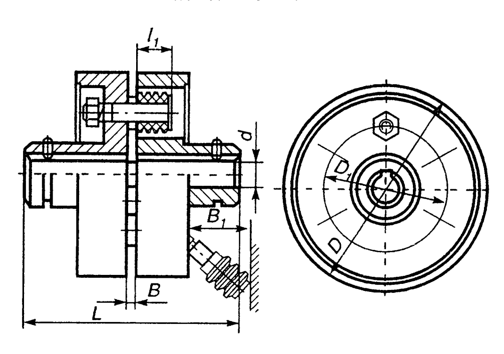
Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4,0	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1600
Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (ГОСТ 8328—75)							
Легкая узкая серия							
2202	15	35	11	1,0	5520	3020	16 000
2204	20	47	14	1,5	11 700	7250	12 500
2205	25	52	15	1,5	13 200	8450	10 000
2206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207	35	72	17	2,0	25 000	17 200	8000
2208	40	80	18	2,0	33 000	23 500	8000
2209	45	85	19	2,0	34 300	25 200	6300
2210	50	90	20	2,0	38 000	28 600	6300
2211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216	80	140	26	3,0	78 000	62 300	4000
2217	85	150	28	3,0	97 000	80 900	3150
2218	90	160	30	3,0	119 000	99 000	3150
2220	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500
Средняя узкая серия							
2305	25	62	17	2,0	22 000	14 500	8000
2306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8000
2307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5000
2311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5000
2312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313	65	140	33	3,5	103 000	78 800	4000
2314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3150
2318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2500
2319	95	200	45	4,0	286 000	171 500	2500
2320	100	225	47	4,0	298 000	197 000	2500

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
2322	110	240	50	4,0	301 000	257 000	2000
2324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2000
2326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2000
2328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1600
2332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1600
2336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1250
2340	200	420	80	6,0	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
2605	25	62	24	2,0	36 700	27 800	8000
2606	30	72	27	2,0	40 900	30 600	8000
2607	35	80	32	2,5	45 800	34 200	6300
2608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610	50	110	39	2,5	102 000	85 500	5000
2611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5000
2612	60	130	46	3,5	137 500	116 000	4000
2613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4000
2615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3150
2618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2500
2620	100	215	73	4,0	356 000	336 000	2500
2622	110	240	80	4,0	464 000	450 000	2000
2624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2000
2626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2000
2630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1600
2634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1250
Подшипники шариковые радиальные однорядные с двусторонним уплотнением (ГОСТ 8882—75)							
Легкая широкая серия							
180 500	10	30	14	1,0	4590	2670	8000
180 501	12	32	14	1,0	4690	2670	8000
180 502	15	35	14	1,0	5220	3030	6300
180 503	17	40	16	1,0	7360	4410	6300
180 504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180 505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180 506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180 508	40	80	23	2,0	23 200	17 750	3150
180 509	45	85	23	2,0	24 100	17 850	3150
Средняя широкая серия							
180 602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180 603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000
180 604	20	52	21	2,0	12 250	7800	10 000
180 605	25	62	24	2,0	17 250	11 400	7500

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
180 606	30	77	27	2,0	21 600	14 800	6000
180 607	35	80	31	2,5	25 700	17 550	5500
180 608	40	90	33	2,5	30 600	22 200	4500
180 609	45	100	36	2,5	37 100	26 200	4500
180 610	50	110	40	3,0	47 600	35 600	4100
180 611	55	120	43	3,0	54 900	41 800	4000
180 612	60	130	46	3,5	62 900	48 500	3400
Шарикоподшипники радиально-упорные сдвоенные (ГОСТ 832—78)							
Легкая серия							
346 205	25	52	30	1,5	19 700	16 700	12 500
346 206	30	62	32	1,5	25 800	22 000	10 000
346 209	45	85	38	2,0	48 400	46 200	6300
346 222	110	200	76	3,5	216 500	270 000	3150
346 234	170	310	104	5,0	380 000	600 000	2000
346 244	220	400	130	5,0	412 000	696 000	1000
Средняя серия							
346 308	40	90	46	2,5	59 000	55 100	6300
346 310	50	110	54	3,0	89 500	88 000	5000
346 312	60	130	62	3,5	118 500	118 600	4000
346 313	65	140	66	3,5	140 500	150 000	4000
346 320	100	215	94	4,0	260 000	352 000	2500
346 322	110	240	100	4,0	297 000	414 000	2000
346 330	150	320	130	5,0	445 000	740 000	1250

П р и м е ч а н и е . *d* — внутренний диаметр; *D* — наружный диаметр; *B* — ширина; *r* — радиус закругления обойм; *C* — динамическая грузоподъемность; C_0 — статическая грузоподъемность; *n* — предельная частота вращения подшипника.

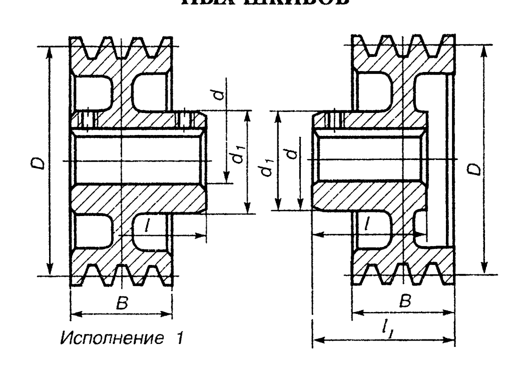
П Р И Л О Ж Е Н И Е 23
РАЗМЕРЫ, МАССА, ДИНАМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ И НАИБОЛЬШИЙ ДОПУСТИМЫЙ КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ УПРУГИХ ВТУЛОЧНО-ПАЛЬЦЕВЫХ МУФТ



Условное обозначение	Размеры, мм							Наибольший крутящийся момент, Н м	Наибольшая частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг $м^2$
	d	D	L	B	B_1	l_1	D_1				
МУВП 1—22	22	100	104	1—4	28	25	68	54	5600	2,140	0,002
МУВП 1—28	28	120	125	1—5	42	32	84	127	4750	4,400	0,006
МУВП 1—32	32	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	7,330	0,014
МУВП 1—38	38	140	165	1—5	42	32	100	235	4000	6,970	0,014
МУВП 1—42	42	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	13,27	0,039
МУВП 1—45	45	170	226	2—6	55	42	120	440	3350	12,93	0,039
МУВП 1—48	48	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	18,04	0,064
МУВП 1—55	55	190	226	2—6	55	42	140	685	3000	17,12	0,064
МУВП 1—60	60	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,95	0,130
МУВП 1—65	65	220	286	2—6	55	42	170	1080	2650	27,17	0,130
МУВП 1—70	70	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	38,43	0,240
МУВП 1—75	75	250	288	2—8	70	58	190	1960	2240	37,29	0,240
МУВП 1—80	80	320	350	2—10	85	75	190	3920	1700	83,21	0,810
МУВП 1—85	85	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	81,64	0,810
МУВП 1—90	90	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	80,01	0,81
МУВП 1—95	95	320	350	2—10	85	75	242	3920	1700	78,26	0,81
МУВП 1—100	100	400	432	2—12	110	90	242	7850	1400	161,8	2,45
МУВП 1—110	110	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	156,9	2,45
МУВП 1—120	120	400	432	2—12	110	90	300	7850	1400	151,6	2,45
МУВП 1—125	125	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	272,9	6,75
МУВП 1—130	130	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	269,3	6,75
МУВП 1—140	140	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	291	7,1
МУВП 1—150	150	500	515	2—15	130	110	380	11 000	1120	282,9	7,1

Примечание Данные таблицы соответствуют нормам для машиностроения МН 2096—64.

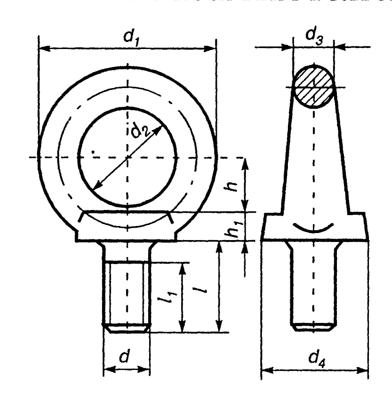
ПРИЛОЖЕНИЕ 24
РАЗМЕРЫ, МАССА И ДИНАМИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ИНЕРЦИИ КЛИНОРЕМЕННЫХ ШКИВОВ



Исполнение 1

Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг м^2	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	*D*	*B*	*l*	l_1	d_1				
121 001	14	112	16	30	—	32	1,06	0,0015	1	МН 4437—63
121 008	22	112	40	50	56	40	1,71	0,003	2	»
121 010	28	112	40	60	—	50	1,95	0,003	1	»
121 023	32	125	40	80	—	60	2,81	0,005	1	»
221 029	38	140	38	80	—	80	5,40	0,011	1	МН 4440—63
221 073'	42	200	68	110	—	80	7,81	0,043	1	»
321 070	48	224	105	110	—	80	14,0	0,105	1	МН 4443—63
324 075	55	224	105	110	130	100	15,5	0,109	2	»
421 030	60	250	138	140	—	125	28,0	0,23	1	МН 4446—63
421 031	65	250	138	140	—	125	27,5	0,23	1	»
421 051	70	280	164	140	—	125	34,1	0,39	1	»
421 052	75	280	164	140	—	125	33,5	0,39	1	»

ПРИЛОЖЕНИЕ 25
РАЗМЕРЫ И МАССА РЫМ-БОЛТОВ



Условное обозначение резьбы, *d*	Размеры, мм								Масса рым-болта, кг	Допустимая масса машины, кг
	d_1	d_2	d_3	d_4	*h*	h_1	*l*	l_1 (не менее)		
M8	36	20	8	20	12	6	18	12	0,05	120
M10	45	25	10	25	16	8	21	15	0,12	200
M12	54	30	12	30	18	10	25	19	0,19	300
M16	63	35	14	36	20	12	32	25	0,31	550
M20	72	40	16	40	24	14	38	29	0,50	850
M24	90	50	20	50	29	16	45	35	0,87	1250
M30	108	60	24	63	37	18	55	44	1,58	2000
M36	126	70	28	75	43	22	63	51	2,43	3000
M42	144	80	32	85	50	25	72	58	3,72	4000

Условное обозначение резьбы, d	Размеры, мм								Масса рым-болта, кг	Допустимая масса машины, кг
	d_1	d_2	d_3	d_4	h	h_1	l	l_1 (не менее)		
М48	162	90	36	95	52	30	82	68	5,54	5000
М56	180	100	40	105	60	34	95	78	8,09	6200

ПРИЛОЖЕНИЕ 26
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Наибольший удельный вес в выпуске электрических машин занимают асинхронные двигатели, конструкция которых относительно простая, а трудоемкость изготовления малая. О масштабах применения и значении этих двигателей в народном хозяйстве страны можно судить по тому, что асинхронные двигатели мощностью от 0,12 до 400 кВт потребляют в России более 40 % всей вырабатываемой электрической энергии.

Ниже приводятся примеры расчета асинхронных двигателей, выполненные в соответствии с методикой, изложенной в книге.

Исходные данные для проектирования

Наименование заданных параметров и их условные обозначения	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Номинальный режим работы	Продолжительный ($S1$)	
Исполнение ротора	Короткозамкнутый	Фазный
Номинальная отдаваемая мощность P_2, кВт	7,5	160
Количество фаз статора m_1	3	3
Способ соединения фаз статора	Δ/λ	Δ/λ
Частота сети f, Гц	50	50
Номинальное линейное напряжение U, В	220/380	380/660
Синхронная частота вращения n_1, об/мин	1500	1000
Степень защиты от внешних воздействий	IP44	IP23
Способ охлаждения	ICO141	ICO1
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001
Климатические условия и категория размещения	У3	У3
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая	
Способ соединения с приводным механизмом	Упругая муфта	
Количество пар полюсов p	2	3

Магнитная цепь двигателя. Размеры, конфигурация, материал

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Принимаем для двигателя № 1 изоляцию класса нагревостойкости B, а для двигателя № 2 — класса F				
Главные размеры				
1	h, мм	табл. 6 1	132	—
2	h, мм	табл. 6.1	—	315

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
3	$D_{н1}$, мм	табл. 6.2	233	590
4	D_1, мм	табл. 6.3	0,68 · 233—5 = 153	0,72 590 — 3 = 424
5	$k_н$	рис. 6.2	0,97	0,98
6	η′, о. е.	рис. 6.3, *а*	0,87	—
7	η′, о. е.	рис. 6.3, *б*	—	0,935 — 0,005 = 0,93
8	cosφ′, о. е.	рис. 6.4, *а*	0,86	—
9	cosφ′ о. Е.	рис. 6 4, *б*	—	0,89 — 0,01 = 0,88
10	*P*′, Вт	(6.1)	$0{,}97 \cdot 7{,}5 \cdot 10^3/$ $/(0{,}87 \cdot 0{,}86) = 9723$	$0{,}98 \cdot 160 \cdot 10^3/$ $/(0{,}93 \cdot 0{,}88) = 191\,600$
11	A'_1, А/см	рис. 6.5, *а* табл 6.5	296 · 0,86 = 255	565 · 0,89 = 503
12	B'_δ, Тл	рис. 6.5, *б* табл. 6 5	0,885	0,858 1,02 = 0,875
13	$k'_{об1}$	§ 6.2	0,94	0,93
14	l'_1, мм	(6.2)	$8{,}62 \cdot 10^7 \cdot 9723/(153^2 \times$ $\times 1500 \cdot 255) \cdot (1/(0{,}885 \times$ $\times 0{,}94)) = 112{,}5$	$8{,}62 \cdot 10^7 \cdot 191 \times$ $\times 600/(424^2 \cdot 1000 \cdot 503 \times$ $\times 0{,}875) \cdot (1/0{,}93)) = 226{,}6$
15	l_1, мм	§ 6.2	115	225
16	λ	(6.4)	115/153 = 0,75	225/424 = 0,53
17	λ_{max}	табл. 6 6 табл. 6.7	1,46 — 0,00071 · 233 = = 1,3	1,05(1,33 — 0,00087 × × 590) = 0,86
		Сердечник статора		
18	Марка стали		2013	2312
19	Толщина стали, мм		0,5	0,5
20	Изолировка		Оксидирование	Лакировка
21	k_c	§ 6.2	0,97	0,95
22	q_1	табл. 6.8 табл. 6.12	3	4
23	z_1	(6.5)	4 3 3 = 36	6 · 3 · 4 = 72
		Сердечник ротора		
24	Марка стали		2013	2312
25	Толщина стали, мм		0,5	0,5
26	Изолировка		Оксидирование	Лакировка
27	k_c	§ 6.2	0,97	0,95
28	$\beta_{ск}$	§ 6.2	1,0	—
29	δ, мм	табл. 6.9	0,35	0,9
30	$D_{н2}$, мм	(6.7)	153 — 2 · 0,35 = 152,3	422 — 2 · 0,9 = 420,2
31	D_2, мм	(6.8)	0,23 · 233 = 54	0,23 · 590 = 140
32	$n_{к2}$,	табл. 6 10	—	12
33	$d_{к2}$, мм	табл. 6.10	—	40
34	l_2, мм	§ 6.2	115	225 + 5 = 230
35	q_2, мм	§ 6.2	—	4 + 0,5 = 4,5
36	z_2	табл. 6 12 (6 10)	34	6 3 · 4,5 = 81

Обмотка статора. Параметры, общие для любой обмотки

Для двигателя № 1 принимаем однослойную всыпную концентрическую обмотку (табл. 6 4) из провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости В), укладываемую в трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 6.8). Для двигателя № 2 принимаем двухслойную обмотку из жестких катушек (табл. 6.4), выполняемую проводом ПЭТП-155 (класс нагревостойкости F), укладываемую в прямоугольные полуоткрытые пазы (см. рис. 6.10).

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
37	k_{p1}	(6 11)	0,5/[3sin(60/(3 2))] = 0,96	0,5/[4sin(60/(4 2))] = 0,959
38	β_1, о е.	§ 6.3	1,0	0,75
39	$y_{п1}$, р паз	(6 12)	36/4 = 9	—
	$y_{п1}$, р паз	(6.13)	—	0,75 · 72/6 = 9
40	k_{y1}	(6 14)	1,0	(0,75 · 90°) = 0,924
41	$k_{об1}$	(6.15)	0,96 · 1 = 0,96	0,959 · 0,924 = 0,886
42	Φ', Вб	(6.16)	0,885 · 153 · 115 10^{-6}/2 = = 0,0078	0,875 · 422 · 225 · 10^{-6}/3 = = 0,0277
43	ω'_1	(6 17)	0,97 220 1/(222 × × 0,96(50/50) 0,0078) = 128	0,98 380/(222 · 0,886 × × 0,0277) = 68
44	a_1	§ 6.3	1	3
45	$N'_{п1}$	(6.18)	128 1/(2 3) = 21,3	68 · 3/(3 · 4) = 17
46	$N_{п1}$	§ 6.3	21	17 = 8 + 9
47	ω_1	(6.19)	21 · 2 3/1 = 126	17 · 3 · 4/3 = 68
48	Φ, Вб	(6 20)	0,0078 · 128/126 = 0,0079	0,0277 · 68/68 = 0,0277
49	B_δ, Тл	(6.21)	0,885 128/126 = 0,9	0,875 · 68/68 = 0,875
50	I_1, А	(6 22)	7,5 · 10^3/(3 · 220 · 0,87 0,86) = = 15,2	160 · 10^3/(3 · 380 · 0,93 0,88) = = 171,5
51	A_1, А/см	(6 23)	10 21 · 36 · 15,2(π ·153 ·1) = = 239	10 · 17 · 72 · 171,5/(π 422 ·3) = =528
52	B_{c1}, Тл	табл 6 13	1,65	1,55
53	t_1, мм	(6 24)	π 153/36 = 13,3	π · 422/72 = 18,4
Обмотка статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами				
54	$B_{з1}$, Тл	табл. 6 14	1,85	—
55	$b_{з1}$, мм	(6 25)	13,3 0,9/(0,97 · 1,85) = 6,67	—
56	h_{c1}, мм	(6.26)	7,9 10^3/(2 · 0,97 · 115 1,65) = =21,5	—
57	$h_{п1}$, мм	(6 27)	(233 — 153)/2 — 21,5 = 18,5	—
58	b_1, мм	(6 28)	[π(153 + 2 ·18,5)/36] — 6,67 = =9,9	—
59	$b'_{ш1}$, мм	(6.36)	0,3 · $(132)^{1/2}$ = 3,5	—
60	b_2, мм	(6 29)	[π(153 + 2 0,5 — 3,5) — 36 × × 6,67]/(36 — π) = 7,07	—
61	Проверка b_1 и b_2, мм	(6.30)	36(9,6 — 7,07) + π(7,07 — — 3,5) — 2π(18,5 — 0,5) ≈ 0	—
62	$S_{п1}$, мм²	(6 31)	[(9,9 + 7,07)/2] (18,5 — 0,5 — — (7,07 — 3,5)/2) = 137,6	—
63	$S'_{п1}$, мм²	(6.32)	((9,9 + 7,07)/2 — 0,1) · (18,5 — — 0,5 — 0,1 — (7,07 — 3,5)/2 = = 136,8	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
64	$S_и$, мм^2	(6.33)	0,25(2 · 18,5 + 9,9 + 7,07) = = 13,5	—
65	$S_{пр}$, мм^2	(6.34)	0,5 · 9,9 + 0,75 · 7,07 = 10,25	—
66	$S''_{п1}$, мм^2	(6.35)	136,8 — 13,5 — 10,25 = 113,1	—
67	$c(d')^2$, мм^2	(6.38) § 6.3	113,1 · 0,75/21 = 4,04 $k'_п = 0,75$	—
68	c	§ 6.3	2	—
69	d', мм	(6.37)	$(0,75 \cdot 113,1(21 \cdot 2))^{1/2} = 1,41$	—
70	d/d', мм	Приложение 1	1,32/1,405	—
71	S, мм^2	Приложение 1	1,368	—
72	$k_п$	(6.37)	21 2 · 1,405^2/113,1 = 0,73	—
73	$b''_{ш1}$, мм	(6.40)	1,405 + 2 · 0,25 + 0,4 = 2,305; принимаем $b_{ш1} = b'_{ш1}$ = 3,5	—
74	J_1, А/мм^2	(6.41)	15,2/(2 · 1,368 · 1) = 5,56	
75	A_1J_1 A^2/(см · мм^2)	§ 6.3	239 · 5,56 = 1329	—
76	$(A_1J_1)_{доп}$ A^2/(см · мм^2)	рис. 6.9	2100 · 0,75 = 1575	—
77	$t_{ср1}$, мм	(6.42)	π(153 + 18,5)/36 = 15	—
78	$b_{ср1}$, мм	(6.43)	15 · 9 = 135	—
79	$l_{л1}$, мм	(6.44)	(1,16 + 0,14 · 2)135 + 15 = 209	—
80	$l_{ср1}$, мм	(6.45)	2(115 + 209) = 648	—
81	$l_{в1}$, мм	(6.46)	(0,19 + 0,1· 2) · 135 + 10 = = 62,65	—
		Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми пазами		
82	$B'_{з1max}$	табл. 6.16	—	1,8
83	$h_{ш1}$, мм	§ 6.3	—	1,0
84	h_k, мм	§ 6.3	—	3,0
85	t_{1min}, мм	(6.48)	—	π(422 + 2 · 1 + 2 · 3)/72 = = 18,8
86	$B'_{з1min}$, мм	(6.49)	—	18,8 · 0,875/(0,95 · 1,8) = 9,6
87	$b'_{п1}$, мм	(6.50)	—	18,8 — 9,6 = 9,2
88	$b'_{ш1}$, мм	(6.51)	—	0,6 · 9,2 = 5,5
89	$N_ш$	§ 6.3	—	1
90	$2b_и$, мм	табл. 6.17	—	2,2
91	$b'_{эф}$, мм	(6.52)	—	(9,2 — 2,2 — 0,3)/1 = 6,7
92	$N_В$	(6.53)	—	17,1 = 17
93	$h'_{с1}$, мм	(6.26)	—	2,77 · 10^4/(2 · 0,95 · 225 × × 1,55) = 41,8
94	$h'_{п1}$, мм	(6.27)	—	(590 — 422)/2 — 41,8 = 42,2
95	$a'_{эф}$, мм	(6 54), табл 6.17	—	(42,2 — 4,5 — 3 — 1 — — 0,3)/17 = 1,96
96	$S'_{эф}$, мм^2	(6 55)		1,96 · 6,7 = 13,14

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
97	c	§ 6.3	—	2
98	c_b	§ 6 3	—	2
99	c_a	§ 6.3	—	1
100	a', мм	(6 56), Приложение 3	—	(1,96/1) — 0,15 = 1,81
101	b', мм	(6 57)	—	(6,7/2) — 0,15 = 3,2
102	$a \times b$, мм	Приложение 2	—	1,8 · 3,35
103	S, мм^2	то же	—	5,667
104	$h_{п1}$, мм	(6.58)	—	17 1(1,8 + 0,15) + 4,5 + 0,3 = = 38
105	$b_{п1}$, мм	(6 59)	—	1 2(3,35 + 0,15) + 2,2 + 0,3 = = 9,5
106	h_{c1}, мм	из (6 27)	—	(590 — 422)/2 — 38 = 46
107	$B_{з1min}$, мм	(6 60)	—	18,8 — 9,5 = 9,3
108	$B_{з1max}$, Тл	(6.61)	—	18,8 · 0,875/(9,3 · 0,95) = 1,8
109	J_1, А/мм^2	(6.41)	—	171,5/(2 5,667 · 3) = 5,04
110	A_1J_1, А^2/(см · мм^2)	§ 6.3	—	528 · 5,04 = 2661
111	$(A_1J_1)_{доп}$, А^2/(см мм^2)	рис. 6.9, табл. 6.15	—	3350 · 0,86 = 2880
112	$t_{ср1}$, мм	(6.42)	—	π(422 + 38)/72 = 20
113	$b_{ср1}$, мм	(6.43)	—	20 · 9 = 180
114	$l_{л1}$, мм	(6.62)	—	1,3 180 + 38 + 50 = 322
115	$l_{ср1}$, мм	(6 45)	—	2(225 + 322) = 1094
116	l_{b1}, мм	(6 64)	—	0,4 180 + 38/2 + 25 = 116

Обмотка короткозамкнутого ротора

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
Размеры овальных полузакрытых пазов			
117	$h_{п2}$, мм	рис. 6.13	25,5
118	h_{c2}, мм	(6.69)	0,38 152,3 — 25,5 — (2/3)0 = 32,4
119	B_{c2}, Тл	(6 70)	0,0079 · 10^6/(2 0,97 · 115 32,4) = 1,09
120	t_2, мм	(6 71)	π 152,3/34 = 14
121	$B_{з2}$, Тл	табл. 6 18	1,7
122	$b_{з2}$, мм	(6 72)	14 · 0,9/(1,7 · 0,97) = 7,6
123	r_2, мм	(6 73)	[π(152,3 — 2 · 25,5) — 34 · 7,6]/[2(34 — — π)] ≈ 1,0
124	r_1, мм	(6.74)	[π(152,3 — 2 0,75 — 2 0,3) — 34 × × 7,6]/[2(34 + π)] = 2,9
125	h_1, мм	(6 75)	25,5 — 0,75 — 0 — 1 — 2,9 = 20,8
126	Проверка r_2 и r_1	(6 76)	π 20.8 — 34(2,9 — 1) ≈ 0

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
127	$S_{ст} = S_{п2}$, мм^2	(6 77)	$(\pi/2)(2{,}9^2 + 1^2) + (2{,}9 + 1)20{,}8 = 95{,}9$
Размеры короткозамыкающего кольца			
128	$S_{кл}$, мм^2	(6 95)	0,4 · 34 95,9/4 = 326
129	$h_{кл}$, мм^2	(6.97)	1,2 · 25,5 = 30,6
130	$l_{кл}$, мм	(6 99)	326/30,6 = 10,65
131	$D_{кл\ ср}$, мм	(6 100)	152,3 — 30,6 = 121,7

Обмотка фазного ротора

Для фазного ротора выбраны прямоугольные полузакрытые пазы.

Двухслойная волновая обмотка из медных изолированных стержней прямоугольного сечения, количество параллельных ветвей $a_2 = 1$; количество эффективных проводников в пазу $N_{п2} = 2$.

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 2
132	ω_2	(6 103)	6 4,5 = 27
133	$y_{п2}$	§ 6 5	3 · 4,5 — 1/2 = 13
134	$y'_{п2}$	§ 6 5	3 · 4,5 + 1/2 = 14
135	$y''_{п2}$	§ 6.5	3 · 4,5 — 1/2 = 13
136	$k_{р2}$	(6 11)	0,5/[4,5sin(60/(4,5 · 2))] = 0,95
137	β_2	§ 6.5	0,96
138	$k_{у2}$	(6.14)	sin(0,96 · 90°) = 0,998
139	$k_{об2}$	(6.15)	0,956 · 0,998 = 0,954
140	$k_{тр}$	(6.104)	68 · 0,886/(27 0,954) = 2,33
141	E_2, В	(6.105)	0,98 · 380/2,33 = 160
142	U_k, В	(6.106)	$3^{1/2}$ 160 = 277
143	$h'_{п2}$, мм	Табл. 6.20	45,5
144	$h'_{с2}$, мм	(6.69)	0,38 · 420,2 — 45,5 — (2/3)40 = 87,5
145	$B'_{с2}$, Тл	(6.70)	0,0277 10^6/(2 · 0,95 230 · 87,5) = 0,724
146	t_2, мм	(6.71)	π 420,2/81 = 16,3
147	$B'_{з2max}$, Тл	Табл 6 19	1,9
148	$b'_{з2min}$, мм	(6 85)	16,3 · 0,875/(1,9 0,95) = 7,9
149	$b'_{п2}$, мм	(6 86)	[π(420,2 — 2 · 45,5)/81] — 7,9 = 4,87
150	h', мм	§ 6.5 (6.107)	(45,5 — 4,5 —2,5 — 1,0 — 0,3)/2 = 18,6
151	b', мм	§ 6 5 (6.108)	4,87 — 1,6 — 0,3 = 2,97
152	$h_{ст}$, мм	Приложение 2	18,0
153	$b_{ст}$, мм	То же	3,28
154	$S_{ст}$, мм^2	»	58,56
155	$h_{п2}$, мм	(6 109)	2 18 + 4,5 + 2,5 + 1,0 + 0,3 = 44
156	$b_{п2}$, мм	(6.110)	3,28 + 1,6 + 0,3 = 5,18
157	$h_{с2}$, мм	(6.69)	0,38 · 420,2 — 44,3 — (2/3)40 = 88,7
158	$B_{с2}$, Тл	(6.70)	0,0277 10^6/(2 · 0,95 · 230 88,7) = 0,715
159	$b_{з2min}$, мм	(6.92)	[π(420,2 — 2 · 44,3)/81] — 5,18 = 7,7

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 2
160	$B_{з2max}$, Тл	(6.93)	[16,3 0,875]/[7,7 · 0,95] = 1,95
161	$t_{ср2}$, мм	(6 111)	π(420,2 — 44,3)/81 = 14,58
162	$b_{ср2}$, мм	(6 112)	14,58 · 13,5 = 197
163	$l_{л2}$, мм	(6.113)	1,2 197 44,3 + 50 = 330,7
164	$l_{ср2}$, мм	(6.115)	2(230 + 330,7) = 1121
165	$l_{в2}$, мм	(6.116)	0,3 · 197 + 44,3/2 + 25 = 106,2

Расчет магнитной цепи

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
166	$k_{\delta 1}$	(6 118)	1 + [3,5/(13,3 — 3,5 + 5 × × 0,35 · 13,3/3,5)] = 1,21	1 + [5,5/(18,4 — 5,5 + 5 × × 0,9 · 18,4/5,5)] = 1,2
167	$k_{\delta 2}$	(6.19)	1 + [1,5/(14 — 1,5 + 5 × × 0,35 · 14/1,5)] = 1,052	1 + [1,5/(16,3 — 1,5 + 5 × × 0,9 · 16,3/1,5)] = 1,024
168	k_k	§ 6.6	1,0	1,0
169	k_δ	(6.122)	1,21 1,052 · 1,0 = 1,27	1,2 1,024 · 1,0 = 1,23
170	F_δ, А	(6.123)	0,8 · 0,35 1,27 0,9 · 10^3 = = 320	0,8 · 0,9 · 1,23 0,875 · 10^3 = = 775
171	$t_{1(1/3)}$, мм	(6.124)	π(153 + 2 18,5/3)/36 = = 14,4	π(422 + 2 · 38/3)/72 = 19,5
172	$k_{з(1/3)}$	(6 125)	14,4/(6,67 0,97) = 2,23	—
173	$H_{з1}$, А/см	Приложение 14	15,2	—
174	$b_{з1(1/3)}$, мм	(6 128)	—	19,5 — 9,5 = 10
175	$B_{з1(1/3)}$, Тл	(6.129)	—	18,4 0,875/(0,95 10) = 1,69
176	$H_{з1}$, А/см	Приложение 9	—	18,4
177	$L_{з1}$, мм	(6 126)	18,5	38
178	$F_{з1}$, А	(6.127)	0,1 15,2 18,5 = 28,1	0,1 18,4 · 38 = 70
179	$H_{з2}$, А/см	Приложение 8	11,5	—
180	$L_{з2}$, мм	(6.141)	25,5 — 0,2 1 = 25,3	—
181	$F_{з2}$, А	(6.142)	0,1 11,5 25,3 = 29	—
182	t_{2min}, мм	(6.156)	—	π(420 — 2 · 44,3)/81 = 12,9
183	$b_{з2min}$, мм	(6 157)	—	12,9 — 5,18 = 7,7
184	$b_{з2max}$, мм	(6 158)	—	16,3 — 5,18 = 11,1
185	$b_{з2ср}$, мм	(6.159)	—	(7,7 + 11,1)/2 = 9,4
186	$B_{з2max}$, Тл	(6 93)	—	16,3 0,875/(7,7 · 0,95) = 1,95
187	$B_{з2min}$, Тл	(6.160)	—	16,3 · 0,875/(11,1· 0,95) = 1,35
188	$b_{з2ср}$, Тл	(6 161)	—	16,3 0,875/(9,4 · 0,95) = 1,6
189	$k_{з2max}$	(6 162)	—	[12,9/(7,7 0,95)] — 1 = 0,76
190	$H_{з2max}$, А/см	Приложение 15	—	45
191	$H_{з2min}$, А/см	Приложение 9	—	8
192	$H_{з2ср}$, А/см	То же	—	14,5
193	$H_{з2}$, А/см	(6.165)	—	(45 + 4 14,5 + 8)/6 = 18,5
194	$L_{з2}$, мм	(6.166)	—	44,3

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
195	$F_{з2}$, А	(6.167)	—	0,1 18,5 · 44,3 = 82
196	H_{c1}, А/см	Приложение 11	9,4	—
197	H_{c1}, А/см	Приложение 12	—	10,9
198	L_{c1}, мм	(6 168)	π(233 — 21,5)/(4 2) = 83,1	π(590 — 46)/(4 3) = 142
199	F_{c1}, А	(6 169)	0,1 9,4 83,1 = 78	0,1 · 10,9 142 = 155
200	H_{c2}, А/см	Приложение 5	0,7	—
201	H_{c2}, А/см	Приложение 6	—	0,795
202	L_{c2}, мм	(6.171)	π(54 + 32,4)/(4 2) = 33,9	π(140 + 88,7 + 4 40/3)/(4 ·3) = = 73,8
203	F_{c2}, А	(6 172)	0,1 · 0,7 · 33,9 = 2,4	0,1 0,795 73,8 = 5,9
204	F_{Σ}, А	(6.173)	320 + 28,1 + 29 + 78 + 2,4 = = 457,5	775 + 70 + 82 + 155 + 5,9 = = 1088
205	$k_{нас}$	(6.174)	457,5/320 = 1,43	1088/775 = 1,4
206	$I_{м}$, А	(6.175)	[2,22 · 457,5 · 2]/[3 · 126 × × 0,96] = 5,6	[2,22 · 1088 · 3]/[3 · 68 × × 0,886] = 40,1
207	$I_{м}$, о. е.	(6.176)	5,6/15,2 = 0,37	40,1/171,5 = 0,234
208	E, В	(6 177)	0,97 · 220 = 213	0,98 · 380 = 372,4
209	$x_{м}$, Ом	(6.178)	213/5,6 = 38	372,4/40,1 = 9,3
210	$x_{м}$, о е.	(6.179)	38 · 15,2/220 = 2,63	9,3 171,5/380 = 4,2

Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
211	r_1, Ом	(6.180)	126 · 648/(57 1 · 2 · 1,368 × × 10^3) = 0,524	68 1094/(57 · 3 · 2 · 5,667 × × 10^3) = 0,0384
212	r_1, о. е	(6.181)	0,524 · 15,2/220 = 0,036	0,0384 · 171,5/380 = 0,0173
213	r_1, о. е.	(6.182)	π153(239 · 5,56)648/(114 · 10^4 × × 3 · 220 · 15,2) = 0,036	π422(528 · 5,04)1094/(114 × × 10^4 · 3 · 380 · 171,5) = 0,0173
214	Размеры паза статора, мм	Рис 6.8 § 6 3 табл. 6.21	b_2 = 7,07; $b_{ш1}$ = 3,5; $h_{ш1}$ = = 0,5; $h_{к1}$ = 0,7; h_2 = 0,6; $h_{п1}$ = 18,5; h_1 = 18,5 — 0,5 — — 0,7 — 0,6 — 0 = 16,7	—
215	$k_{\beta1}$	(6.183)	1,0	—
216	$k'_{\beta1}$	(6.184)	1,0	—
217	$\lambda_{п1}$	(6.187)	(16,7/(3 7,07)) · 1 + (3 × × 0,7/(7,07 + 2 3,5) + 0,5/3,5 + + 0,6/7,07) · 1 = 1,16	—
218	Размеры паза статора, мм	Рис 6.10 § 6.3 табл 6.21	—	$b_{п1}$ = 9,5; $b_{ш1}$ = 5,5; $h_{ш1}$ = = 1,0; $h_{к1}$ = 3,0; h_3 = 1,9; $h_{п1}$ = 38; h_1 = 38 — 1 — 3 — — 1,9 — 1 = 31,1
219	$k_{\beta1}$	(6 183)	—	0,4 + 0,6 · 0,75 = 0,85
220	$k'_{\beta1}$	(6 184)	—	0,2 + 0,8 0,75 = 0,8
221	$\lambda_{п1}$	(6 188)	—	1/(4 — 9,5) + (31,1 — 1) × × 0,85/(3 · 9,5) + (3 3/(9,5 + + 2 5,5) + 1/5,5 + 1,9/9,5) × × 0,8 = 1,55

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
222	$k_{д1}$	табл 6.23	0,0141	0,0062
223	$k_{ш1}$	(6.190)	$1 - 0{,}033 \cdot 3{,}5^2/(13{,}3 \cdot 0{,}35) = 0{,}91$	$1 - 0{,}033 \cdot 5{,}5^2/(18{,}8 \cdot 0{,}9) = 0{,}94$
224	$k_{р1}$	табл 6.22	0,91	—
225	$\lambda_{д1}$	(6 191)	$0{,}9 \cdot 13{,}3 \cdot (3 \cdot 0{,}96)^2 \cdot 0{,}91 \times 0{,}91 \cdot 0{,}0141/(0{,}35 \cdot 1{,}27) = 3{,}85$	$0{,}9 \cdot 18{,}8 \cdot (3 \cdot 0{,}886)^2 \cdot 1 \times 0{,}94 \cdot 0{,}0062/(0{,}9 \cdot 1{,}23) = 1{,}31$
226	τ, мм	(6.192)	$\pi 153/4 = 120$	$\pi 422/6 = 221$
227	$\lambda_{л1}$	(6 193)	$0{,}34 \cdot (209 - 0{,}64 \cdot 1 \cdot 120) \times 3/115 = 1{,}17$	$0{,}34 \cdot (322 - 0{,}64 \cdot 0{,}75 \times 221) \cdot 4/225 = 1{,}3$
228	λ_1	(6.194)	$1{,}16 + 3{,}85 + 1{,}17 = 6{,}18$	$1{,}55 + 1{,}31 + 1{,}3 = 4{,}16$
229	x_1, Ом	(6.195)	$1{,}58 \cdot 50 \cdot 115 \cdot 126^2 \cdot 6{,}18/(2 \times 3 \cdot 10^8) = 1{,}49$	$1{,}58 \cdot 50 \cdot 225 \cdot 68^2 \cdot 4{,}16/(3 \times 4 \cdot 10^8) = 0{,}285$
230	x_1, о. е.	(6.196)	$1{,}49 \cdot 15{,}2/220 = 0{,}1$	$0{,}285 \cdot 171{,}5/380 = 0{,}13$
231	x_1, о. е.	(6.197)	$0{,}39(153 \cdot 239)^2 \cdot 115 \cdot 6{,}18 \times 10^{-7}/(3 \cdot 220 \cdot 15{,}2 \cdot 36) = 0{,}1$	$0{,}39(422 \cdot 528)^2 \cdot 225 \cdot 4{,}16 \times 10^{-7}/(3 \cdot 380 \cdot 177{,}5 \cdot 72) = 0{,}13$
232	$r_{ст}$, Ом	(6.198)	$115/(27 \cdot 95{,}9 \cdot 10^3) = 4{,}44 \cdot 10^{-5}$	—
233	$k_{пр2}$	(6.200)	$2\pi \cdot 2/34 = 0{,}37$	—
234	$r_{кл}$, Ом	(6.201)	$(2\pi \cdot 121{,}7)/(27 \cdot 34 \cdot 326 \times 0{,}37^2 \cdot 10^3) = 1{,}87 \cdot 10^{-5}$	—
235	$\alpha_{ск}$, рад	(6.202)	$4 \cdot 13{,}3/153 = 0{,}35$	—
236	$k_{ск}$	рис 6.17	0,996	—
237	$k_{пр1}$	(6.203)	$4 \cdot 3(126 \cdot 0{,}96/0{,}996)^2/34 = 5206$	
238	r'_2, Ом	(6 204)	$5206 \cdot (4{,}44 + 1{,}87) \cdot 10^{-5} = 0{,}328$	—
239	r'_2, о е	(6.205)	$0{,}328 \cdot 15{,}2/220 = 0{,}0227$	—
240	I_2, А	(6.206)	$2 \cdot 126 \cdot 0{,}96 \cdot 7{,}5 \cdot (0{,}2 + 0{,}8 \cdot 0{,}86) \cdot 10^3/(220 \cdot 34 \cdot 0{,}86 \cdot 0{,}86) = 288$	—
241	$\lambda_{п2}$	(6.207)	$0{,}75/1{,}5 + (20{,}8 + 0{,}8 \cdot 1) \times (1 - 2{,}9^2/(2 \cdot 95{,}9))^2/(6 \times 2{,}9) + 0{,}66 - 1{,}5/(4 \cdot 2{,}9) = = 1{,}95$	—
242	q_2	(6.10)	$34/(4 \cdot 3) = 2{,}8$	—
243	$k_{д2}$	рис. 6.18	0,012	—
244	$\lambda_{д2}$	(6.209)	$0{,}9 \cdot 14 \cdot (34/(6 \cdot 2))^2 \times 0{,}012/(0{,}35 \cdot 1{,}27) = 2{,}73$	
245	$\lambda_{кл}$	(6.210)	$2{,}9 \cdot 121{,}7 \cdot \lg(2{,}35 \times 121{,}7/(30{,}6 + 10{,}65))/(34 \times 115 \cdot 0{,}37^2) = 0{,}436$	—
246	$\beta_{ск2}$	(6.211)	$1 \cdot 13{,}3/14 = 0{,}95$	—
247	$\lambda_{ск}$	(6.212)	$14 \cdot 0{,}95^2/(9{,}5 \cdot 0{,}35 \cdot 1{,}27 \times 1{,}43) = 2{,}1$	—
248	λ_2	(6.213)	$1{,}95 + 2{,}73 + 0{,}436 + 2{,}1 = 7{,}2$	—

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
249	x_2, Ом	(6.214)	$7{,}9 \cdot 50 \cdot 115 \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-9} = 0{,}32 \quad 10^{-3}$	—
250	x'_2, Ом	(6.215)	$5206 \quad 0{,}32 \cdot 10^{-3} = 1{,}67$	—
251	x'_2, о е	(6.216)	$1{,}67 \cdot 15{,}2/220 = 0{,}115$	—
252	x_1/x'_2, о. е.	(6.217)	$1{,}48/1{,}67 = 0{,}886$	—
253	r_2, Ом	(6.235)	—	$27 \cdot 1121/(57 \cdot 58{,}56 \cdot 1 \cdot 10^3) = 0{,}009$
254	$k_{пр}$	(6.236)	—	$(68 \cdot 0{,}886/(27 \cdot 0{,}954))^2 = 5{,}47$
255	r'_2, Ом	(6.237)	—	$5{,}47 \cdot 0{,}009 = 0{,}049$
256	r'_2, о е	(6 205)	—	$0{,}049 \cdot 171{,}5/380 = 0{,}022$
257	$k_{\beta 2}$	(6 183)	—	$0{,}4 + 0{,}6 \cdot 0{,}962 = 0{,}977$
258	$k'_{\beta 2}$	(6.184)	—	$0{,}2 + 0{,}8 \cdot 0{,}962 = 0{,}97$
259	Размеры паза ротора, мм	Рис 6.16 табл. 6.21	—	$h_2 = 1{,}1$ мм; $b_{ш2} = 1{,}5$ мм; $h_3 = 1{,}6$ мм; $b_{п2} = 5{,}18$ мм; $h_{к2} = 3{,}0$ мм; $b_{ш2} = 1$ мм; $h_1 = 44{,}3 - 1 - 3{,}0 - 1{,}1 - 1{,}6 = 37{,}6$
260	$\lambda_{п2}$	(6 238)	—	$1{,}6/(4 \cdot 5{,}18) + (37{,}6 - 1{,}6) \times 0{,}977/(3 \cdot 5{,}18) + (1{,}1/5{,}18 + 3{,}3/(5{,}18 + 2 \cdot 1{,}5) + 1/1{,}5) \times 0{,}97 = 4{,}28$
261	$k_{ш2}$	(6.239)	—	$1 - 0{,}033 \cdot 1{,}5^2/(16{,}3 \cdot 0{,}9) = 0{,}995$
262	$k_{д2}$	Рис. 6.20	—	0,0051
263	$\lambda_{д2}$	(6.240)	—	$0{,}9 \cdot 16{,}3(4{,}5 \cdot 0{,}954)^2 \cdot 0{,}995 \times 0{,}0051/(0{,}9 \quad 1{,}21) = 0{,}9$
264	τ_2, мм	(6.241)	—	$\pi 420{,}2/6 = 220$
265	$\lambda_{л2}$	(6.242)	—	$0{,}34 \cdot 4{,}5(330{,}7 - 0{,}64 \times 0{,}963 \cdot 220)/230 = 1{,}3$
266	λ_2	(6.243)	—	$4{,}28 + 0{,}9 + 1{,}3 = 6{,}48$
267	x_2, Ом	(6.244)	—	$1{,}58 \cdot 50 \quad 230 \cdot 27^2 \cdot 6{,}48/(3 \times 4{,}5 \quad 10^8) = 0{,}064$
268	x'_2, Ом	(6 245)	—	$5{,}47 \cdot 0{,}064 = 0{,}35$
269	x'_2, о. е	(6.216)	—	$0{,}35 \cdot 171{,}5/380 = 0{,}16$
270	x_1/x'_2	(6.217)	—	$0{,}27/0{,}35 = 0{,}77$
271	τ_1	(6.246)	$1{,}49/38 = 0{,}04$	$0{,}285/9{,}3 = 0{,}03$
272	ρ_1	(6 247)	$0{,}524 \cdot 1{,}22/(1{,}49 + 38) = 0{,}016$	$0{,}0384 \cdot 1{,}38/(0{,}285 + 9{,}3) = 0{,}0055$
273	r'_1, Ом	(6 248)	$1{,}22 \cdot 0{,}524 = 0{,}64$	$1{,}38 \cdot 0{,}0384 = 0{,}053$
274	x'_1, Ом	(6 248)	$1{,}49(1 + 0{,}04) = 1{,}55$	$0{,}285(1 + 0{,}03) = 0{,}294$
275	r''_2, Ом	(6 248)	$1{,}22 \cdot 0{,}328(1 + 0{,}04)^2 = 0{,}43$	$1{,}38 \cdot 0{,}049(1 + 0{,}03)^2 = 0{,}07$
276	x''_2, Ом	(6 248)	$1{,}67(1 + 0{,}04)^2 = 1{,}8$	$0{,}35(1 + 0{,}03)^2 = 0{,}37$

П р и м е ч а н и е . Пересчет магнитной цепи не требуется, так как $k_{нас} < 1{,}7$, а $\tau_1 < 0{,}05$.

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
277	$I_{c\,p}$, А	(6 259)	$220/(38{,}4(1 + 0{,}04)) = 5{,}57$	$380/(9{,}3(1 + 0{,}03)) = 39{,}7$
278	$P_{c\,м1}$, Вт	(6 260)	$3\ \ 5{,}57^2\ \ 0{,}64 = 59{,}57$	$3 \cdot 39{,}7^2 \cdot 0{,}053 = 250{,}6$
279	$m_{з1}$, кг	(6 261)	$7{,}8\ \ 36 \cdot 6{,}67 \cdot 18{,}5 \cdot 115 \times$ $\times 0{,}97\ \ 10^{-6} = 3{,}87$	—
280	$P_{з1}$, Вт	(6.252)	$4{,}4\ \ 1{,}85\ \ 3{,}9 = 58{,}6$	—
281	t_{1max}, мм	(6.130)	—	$\pi(422 + 2 \cdot 38)/72 = 21{,}7$
282	$b_{з1max}$, мм	(6 131)	—	$21{,}7 - 9{,}5 = 12{,}2$
283	$b_{з1ср}$, мм	(6.132)	—	$(9{,}3 + 12{,}2)/2 = 10{,}75$
284	$B_{з1ср}$, Тл	(6.134)	—	$18{,}4\ \ 0{,}875/(10{,}75 \cdot 0{,}95) = 1{,}58$
285	$m_{з1}$, кг	(6.262)	—	$7{,}8 \cdot 72 \cdot 10{,}75 \cdot 38 \cdot 225 \times$ $\times 0{,}95 \cdot 10^{-6} = 49$
286	$P_{з1}$, Вт	(6.253)	—	$3 \cdot 1{,}58^2 \cdot 49 = 367$
287	m_{c1}, кг	(6 263)	$7{,}8\pi(233 - 21{,}4)21{,}4 \cdot 115 \times$ $\times 0{,}97\ \ 10^{-6} = 12{,}4$	$7{,}8\pi(590 - 46)46 \cdot 225 \cdot 0{,}95 \times$ $\times 10^{-6} = 131$
288	P_{c1}, Вт	(6 256)	$4{,}4 \cdot 1{,}65^2\ \ 12{,}4 = 148{,}5$	—
289	P_{c1}, Вт	(6 257)	—	$3 \cdot 1{,}55^2 \cdot 131 = 944$
290	$P_{c\Sigma}$, Вт	(6.264)	$58{,}6(1 + 2(1{,}27 - 1)$ $\cdot (13{,}3/10)^{1/2}) + 148{,}5 = 243{,}6$	$367(1 + 2(1{,}23 - 1)(18{,}4/10)^{1/2} +$ $+ 944 = 1537$
291	$P_{мх\Sigma}$, Вт	(6 267)	$1(1500/1000)^2(233/100)^4 = 66{,}3$	—
292	$P_{мх\Sigma}$, Вт	(6.265)	—	$6{,}5(1000/1000)^2 \cdot (422/100)^3 =$ $= 488$
293	$I_{о.а}$, А	(6.269)	$(59{,}57 + 243{,}64 + 66{,}3)/(3 \times$ $\times 220) = 0{,}56$	$(250{,}6 + 1537 + 488)/(3 \cdot 380) =$ $= 2{,}0$
294	$I_о$, А	(6 270)	$(0{,}56^2 + 5{,}57^2)^{1/2} = 5{,}6$	$(2^2 + 39{,}7^2)^{1/2} = 39{,}75$
295	$\cos\varphi_о$	(6 271)	$0{,}56/5{,}6 = 0{,}1$	$2/39{,}75 = 0{,}05$
296	$r_к$, Ом	(6 273)	$0{,}64 + 0{,}43 = 1{,}07$	$0{,}053 + 0{,}07 = 0{,}123$
297	$x_к$, Ом	(6.274)	$1{,}55 + 1{,}8 = 3{,}35$	$0{,}294 + 0{,}37 = 0{,}664$
298	$z_к$, Ом	(6 275)	$(1{,}07^2 + 3{,}35^2)^{1/2} = 3{,}52$	$(0{,}123^2 + 0{,}664^2)^{1/2} = 0{,}675$
299	$P_д$, Вт	(6 276)	$0{,}005\ \ 7{,}5 \cdot 10^3/0{,}87 = 43$	$0{,}005 \cdot 160 \cdot 10^3/0{,}93 = 860$
300	P'_2, Вт	(6 277)	$7{,}5\ \ 10^3 + 66{,}3 + 43 = 7610$	$160 \cdot 10^3 + 488 + 860 = 161\,350$
301	$R_Н$, Ом	(6 272а)	$3 \cdot 220^2/(2 \cdot 7610) - 1{,}07 + ((3 \times$ $\times 220^2/(2\ \ 7610) - 1{,}07)^2 -$ $- 3{,}52^2)^{1/2} = 16{,}17$	$3\ \ 380^2/(2 \cdot 161\,350) - 0{,}123 +$ $+ ((3 \cdot 380^2/(2 \cdot 161\,350) -$ $- 0{,}123)^2 - 0{,}675^2)^{1/2} = 2{,}24$
302	$z_н$, Ом	(6 278)	$((16{,}17 + 1{,}07)^2 + 3{,}35^2)^{1/2} =$ $= 17{,}56$	$((2{,}24 + 0{,}123)^2) + 0{,}664^2)^{1/2} =$ $= 2{,}45$
303	Проверка, $Ом^{-1}$	(6 279)	$16{,}17/17{,}56^2 = 0{,}0524$ $7610/(3 \cdot 220^2) = 0{,}0524$	$2{,}24/2{,}45^2 = 0{,}373$ $161\,350/(3 \cdot 380^2) = 0{,}373$
304	$s_н$, о е.	(6 280)	$1/(1 + 16{,}17/0{,}43) = 0{,}026$	$1/(1 + 2{,}24/0{,}07) = 0{,}03$
305	$I_{c.a}$, А	(6 281)	$(59{,}57 + 243{,}6)/(3\ \ 220) = 0{,}46$	$(250{,}6 + 1537)/(3 \cdot 380) = 1{,}57$
306	I''_2, А	(6.282)	$220/17{,}56 = 12{,}5$	$380/2{,}45 = 155$
307	$I_{а1}$, А	(6 283)	$0{,}46 + 12{,}5((16{,}17 + 1{,}07) +$ $+ 3{,}35 \cdot 2 \cdot 0{,}016)/17{,}56 = 12{,}8$	$1{,}57 + 155(2{,}24 + 0{,}123) +$ $+ 0{,}0664 \cdot 2 \cdot 0{,}0055)/2{,}45 = 151$
308	$I_{р1}$, А	(6 284)	$5{,}57 + 12{,}5(3{,}35 - (16{,}17 -$ $-1{,}07) \cdot 2 \cdot 0{,}016)/17{,}56 = 7{,}61$	$39{,}9 + 155(0{,}664 - (2{,}24 -$ $-0{,}123) \cdot 2 \cdot 0{,}0055)/2{,}45 = 80{,}2$
309	I_1, А	(6 285)	$(12{,}8^2 + 7{,}61^2)^{1/2} = 14{,}9$	$(151^2 + 80{,}2^2)^{1/2} = 171$

Последо-вательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
310	cos φ	(6 286)	12,8/14,9 = 0,86	151/171 = 0,88
311	A_1, А/см	(6.287)	(10 · 14,9 21)/(1 13,3) = 235	10 · 171 ·17/(3 18,4) = 527
312	J_1, А/мм^2	(6 41)	14,9/(2 1,368 · 1) = 5,5	171/(2 5,667 · 3) = 5,03
313	A_2, А/см	(6.288)	235 12,5 · (1 + 0,04) × × 0,96/(14,9 · 1 0,996) = 197,6	527 155 (1 + 0,03) × × 0,866/(171 · 1 0,954) = 457
314	$I_{ст}$, А	(6.289)	12,52 · 3 · 126 ·0,96 1,04/(34 × × 0,996) = 279	—
315	$J_{ст}$, А/мм^2	(6.290)	279/95,9 = 2,9	—
316	$I_{кл}$, А	(6 291)	279/0,37 = 754	—
317	I_2, А	(6 294)	—	155 68 · 0,886 · (1 + + 0,04)/(27 0,954) = 377
318	J_2, А/мм^2	(6 295)	—	377/(1 · 58,56 · 1) = 6,44
319	$P_{м1}$, Вт	(6 296)	3 · 14,9^2 · 0,64 = 426	3 · 171^2 · 0,053 = 4649
320	$P_{м2}$, Вт	(6 297)	3 · 12,5^2 · 0,43 = 202	3 · 155^2 · 0,07 = 5045
321	$P_Σ$, Вт	(6.298)	426 + 202 + 243,6 + 66,4 + 43 = = 981	4649 + 5045 + 1537 + 488 + + 860 = 12 580
322	P_1, Вт	(6.299)	7,5 · 10^3 + 981 = 8480	160 · 10^3 + 12 580 = 172 600
323	η, %	(6.300)	(1 — 981/8480)100 = 88,4	(1 — 12 580/172 600)100 = 92,7
324	Проверка P_1, Вт P_2, Вт	(6.301) (6.302)	3 · 12,8 · 220 = 8450 3 · 14,9 · 220(88,4/100)0,86 = 7500	3 151 380 = 172 140 3 · 171 ·380(92,7/100)0,88 = 160 000

Круговая диаграмма

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
325	c_1, А/мм	по 6.303 § 6.9	220/(200 ÷ 300)3,35 = = 0,328 – 0,218 принимаем c_I = 0,3	380/(200 ÷ 300)0,664 = = 2,86 ÷ 19,1 принимаем c_I = 2,0
326	D_{a}, мм	(6.303)	220/(0,3 · 3,35) = 219	380/(2 · 0,664) = 286
327	c_P, кВт/мм	(6.304)	3 · 220 · 0,3 10^{-3} = 0,2	3 · 380 · 2 · 10^{-3} = 2,3
328	$I_{c\,р}$, мм	§ 6.9	5,57/0,3 = 18,7	39,7/2 = 19,5
329	$I_{c\,а}$, мм	§ 6 9	0,46/0,3 = 1,5	1,67/2 = 0,68
330	BC, мм	(6.305)	2 · 0,016 · 100 = 3,2	2 · 0,0055 · 100 = 1; BC ≈ 0
331	BE, мм	(6.305)	0,64 · 100/3,35 = 19,1	0,053 · 100/0,664 = 8,0
332	BF, мм	(6 305)	1,07 100/3,35 = 32	0,123 · 100/0,664 = 18,5

Рабочие характеристики

Условные обозначения	Источник	Отдаваемая мощность в долях от номинальной P_2				
		0,25P_2	0,5P_2	0,75P_2	P_2	1,25P_2
Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 1						
P_2, кВт	Задание	1,875	3,75	5,625	7,5	9,375
$P_д$, Вт	(6.276)	12	22	33	43	55
P'_2, кВт	(6.277)	1950	3840	5720	7610	9500
$R_н$, Ом	(6.272а)	72	35,3	22,6	16,17	12,1

Условные обозначения	Источник	Отдаваемая мощность в долях от номинальной P_2				
		$0,25P_2$	$0,5P_2$	$0,75P_2$	P_2	$1,25P_2$
$z_н$, Ом	(6 278)	73,2	36,6	23,9	17,56	13,6
s, о е	(6.280)	0,006	0,012	0,019	0,026	0,035
I''_2, А	(6 282)	3	6	9,2	12,5	16,2
I_{a1}, А	(6 283)	3,75	6,5	9,6	12,8	16,3
I_{p1}, А	(6.284)	5,6	5,9	6,5	7,61	9,1
I_1, А	(6 285)	6,7	8,7	11,5	14,3	18,7
cosφ	(6 286)	0,55	0,74	0,83	0,86	0,87
$P_{м1}$, Вт	(6 296)	85	147	257	426	675
$P_{м2}$, Вт	(6.297)	12	46	120	202	347
$P_Σ$, Вт	(6.298)	420	525	720	981	1387
P_1, Вт	(6.299)	2295	4275	6345	8480	10 760
η, %	(6.300)	81,7	87,7	88,7	88,4	87,1
Результаты расчета рабочих характеристик двигателя № 2						
P_2, кВт	Задание	40	80	120	160	200
$P_д$, Вт	(6.276)	215	430	645	860	1075
P'_2, кВт	(6.277)	40 700	80 920	121 100	161 350	201 600
$R_н$, Ом	(6.272а)	10,36	5,02	3,2	2,24	1,64
$z_н$, Ом	(6.278)	10,5	5,18	3,4	2,45	1,88
s, о е.	(6.280)	0,007	0,014	0,024	0,03	0,047
I''_2, А	(6.282)	36,2	73,4	111,8	155	202
I_{a1}, А	(6 283)	37,5	74,3	109,5	151	191,5
I_{p1}, А	(6 284)	40,9	47,5	59,2	80,2	106,7
I_1, А	(6.285)	55,5	88,2	124,5	171	219
cosφ	(6 286)	0,68	0,84	0,87	0,88	0,86
$P_{м1}$, Вт	(6 296)	490	1240	2460	4649	7630
$P_{м2}$, Вт	(6.297)	275	1130	2625	5045	8570
$P_Σ$, Вт	(6.298)	2780	4600	7530	12 580	19 070
P_1, Вт	(6 299)	42 780	84 600	127 500	172 600	219 100
η, %	(6.300)	93,5	94,5	94	92,7	91,3

Максимальный момент

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
333	$λ_{п1пер}$	(6 307)	(3 · 0,7/(7,07 + 2 · 3,5) + 0,5/3,5) · · 1 = 0,29	—
334	$λ_{п1пер}$	(6 308)	—	(3,3/(9,5 + 2 · 5,5) + 1/5,5) · 0,8 = = 0,5
335	$λ_{1пер}$	(6.310)	0,29 + 3,85 = 4,14	0,5 + 1,31 = 1,81
336	$λ_{п2пер}$	(6 311)	0,75/1,5 = 0,5	—
337	$λ_{п2пер}$	(6 315)	—	(3 3,0/(5,18 + 2 1,5) + 1/1,5) × × 0,97 = 1,71
338	$λ_{2пер}$	(6 316)	0,5 + 2,73 = 3,23	1,71 + 0,9 = 2,61

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
339	$x_{пер}$, Ом	(6 317)	1,55 4,14/6,18 + 1,8 3,23/7,1 = = 1,86	0,294 · 0,5/4,16 + 0,37 · 2,61/6,48 = = 0,277
340	$x_{пост}$, Ом	(6 318)	1,55(6,18 — 4,14)/6,18 + 1,8 × × (7,1 — 3,23)/7,1 = 1,49	0,294 (4,16 — 1,81)/4,16 + 0,37 × × (6,48 — 2,61)/6,48 = 0,378
341	$I''_{м2}$, А	(6.323)	$220/(2(0,64^2 + (1,49 + 0,0825 \times 1,86)^2 + 0,64(1,49 + 0,0825 \times 1,86)))^{1/2}$ — $(1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,35 \cdot 1 \times (0,64 + 2 \cdot (1,49 + 0,0825\ 1,86)) \times 1.86/(2 \cdot 21(0,64^2 + (1,49 + 0,0825\ 1,86)^2 + 0,64\ (1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)) = 58,24$	$380/(2(0,053^2 + (0,387 + 0,0825 \times 0,277)^2 + 0,053\ (0,387 + 0,0825 \times 0,277)))^{1/2}$ — $1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 3 \times (0,053 + 2 \cdot\ (0,387 + 0,0825 \times 0,277))0,277/(2 \cdot 17(0,053^2 + (0,387 + 0,0825\ 0,277)^2 + 0,053 \times (0,387 + 0,0825 \cdot 0,277)) = 489$
342	$z_м$, Ом	(6.325)	220/58,24 = 3,78	380/489 = 0,78
343	z_{∞}, Ом	(6 326)	$0,5(0,64^2 + 3,35^2)^{1/2} = 2,5$	$0,5(0,053^2 + 0,664^2)^{1/2} = 0,55$
344	$R_м$, Ом	(6 327)	2,5 + 0,64 = 3,14	0,53 + 0,055 = 0,585
345	$M_{max}/M_н$, о е.	(6 328)	$3\ 220^2(1 — 0,026)/(2 \cdot 3,14 \times 7,5 \cdot 10^3) = 3,0$	$3 \cdot 380^2(1 — 0,03)/(2 \cdot 0,585 \cdot 160 \times 10^3) = 2,2$
346	$s_н$, о е	(6 329)	0,44/2,5 = 0,18	0,07/0,53 = 0,13

Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
347	$h_{ст}$, мм	(6.332)	25,5 — 0,75 = 24,75
348	ξ	(6.331)	$0,0735 \cdot 24,75(1/1,22)^{1/2} = 1,65$
349	φ	Рис. 6.24	0,4
350	$h_р$, мм	(6 334)	24,75/(1 + 0,4) = 17,7
351	$b_р$, мм	(6.335)	2 2,9 — 2(2,9 — 1) · (17,7 — 2,9)/20,8 = = 3,1
352	$s_р$, мм	(6.337)	$(\pi/2) \cdot 2,9^2 + (2,9 + 3,1/2)(17,7 — 2,9) = 79,06$
353	$k_{вт}$	(6.339)	95,9/79,06 = 1,21
354	$r_{ст\ п}$, Ом	(6.340)	$4,44 \cdot 10^{-5} \cdot 1,21 = 5,33 \cdot 10^{-5}$
355	$r'_{2п}$, Ом	(6 341)	$5206(5,33 + 1,85)10^{-5} = 0,374$
356	ψ	рис. 6.24	0,82
557	$\lambda_{п2п}$	(6.342)	$0,75/1,5 + (((20,8 + 0,8 \cdot 1)/(6 \cdot 2,9)) \cdot (1 — \pi \cdot 2,9^2/(2 \cdot 95,9))^2 + 0,66 — 1,5/(4 \cdot 2,9)) \cdot 0,82 = 1,69$
358	$\lambda_{2п}$	(6 344)	1,69 + 2,73 + 0,436 + 2,1 = 6,87
359	$x_{пер}$, Ом	(6.345)	1,55 · 4,14/6,18 + 1,8 · 3,23/6,87 = 1,88
360	$x_{пост}$, Ом	(6.346)	1,55 · (6,18 — 4,14)/6,18 + 1,8 · (6,87 — — 3,23)/6,87 = 1,47
361	$r_{к\ п}$, Ом	(6 347)	$0,64 + 0,374\ 1,22(1 + 0,04)^2 = 1,14$
362	$I''_{п2}$, А	(6.370)	$220/(1,14^2 + (1,47 + 0,0825 \cdot 1,88)^2)^{1/12}$ — $1,24 \cdot 10^3\ 0,35\ 1 \cdot 1,88(1,47 + 0,0825 \times 1,88)/(21(1,14^2 + (1,47 + 0,0825 \cdot 1,88)^2)) = 95,2$
363	$z_{к\ п}$, Ом	(6 372)	220/95,2 = 2,3
364	$x_{к\ п}$, Ом	(6 373)	$(2,3^2 — 1,14^2)^{1/2} = 2,0$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1
365	$I_{п.л1}$, А	(6 374)	$0{,}46 + 95{,}2(1{,}14 + 2{,}0 \cdot 2 \cdot 0{,}016)/2{,}3 = 50{,}3$
366	$I_{п\,р1}$, А	(6.375)	$5{,}57 + 95{,}2(2 - 1{,}14 \cdot 2 \cdot 0{,}016)/2{,}3 = 86{,}9$
367	$I_{п1}$, А	(6 376)	$(50{,}3^3 + 86{,}9^2)^{1/2} = 100{,}4$
368	$I_{п1}/I_1$, о. е.	(6.377)	$100{,}4/14{,}9 = 6{,}7$
369	$r''_{2п}$, Ом	(6.378)	$0{,}374 \cdot 1{,}22 \cdot 1{,}04^2 = 0{,}49$
370	$M_п/M_н$	(6.379)	$3 \cdot 95{,}2^2 \; 0{,}49 \; (1 - 0{,}026)/(7{,}5 \cdot 10^3) = 1{,}7$

Тепловой и вентиляционный расчеты

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
		Тепловой расчет		
371	$P'_{м1}$, Вт	(6.380)	$3 \cdot 14{,}9^2 \; 1{,}4 \cdot 0{,}524 = 489$	$3 \cdot 17^2 \cdot 1{,}48 \cdot 0{,}0384 = 4985$
372	$S_{п1}$, мм^2	(6.381)	$\pi \; 153 \; 115 = 0{,}55 \cdot 10^5$	$\pi \; 422 \; 225 = 3 \; 10^5$
373	$П_1$, мм	(6 382)	$2 \cdot 18{,}5 + 99 + 7{,}07 = 54$	—
374	$П_1$, мм	(6.383)	—	$2(38 + 9{,}5) = 95$
375	$S_{и\,п1}$, мм^2	(6 384)	$36 \; 54 \cdot 115 = 2{,}2 \cdot 10^5$	$72 \cdot 95 \cdot 225 = 15{,}4 \cdot 10^5$
376	$S_{л1}$, мм^2	(6.385)	$4 \; \pi \cdot 153 \; 62{,}65 = 1{,}2 \cdot 10^5$	$4 \cdot \pi \cdot 422 \cdot 116 = 6{,}2 \; 10^5$
377	$h_р$, мм	§ 3.4	$2{,}4(132)^{3/4} = 23$	—
378	$n_р$	§ 3.4	$6{,}4(132)^{1/3} = 8{,}2$ Принимаем $n_р = 12$	—
379	$S_{маш\,р}$, мм	(6 387)	$(\pi \cdot 233 + 8 \cdot 12 \cdot 23) \cdot (115 + 2 \cdot 62{,}65) = 7 \cdot 10^5$	—
380	$S_{маш\,р}$, мм	(6 386)	—	$\pi \cdot 590 \cdot (225 + 2 \cdot 116) = 8{,}5 \cdot 10^5$
381	$p_{п1}$, Вт/мм^2	(6.388)	$0{,}21 \cdot (489 \cdot 2 \cdot 115/648 + 234{,}6)/(0{,}55 \cdot 10^5) = 1{,}6 \; 10^{-3}$	$0{,}77 \cdot (4985 \cdot 2 \cdot 225/1094 + 1537)/(3 \cdot 10^5) = 9{,}2 \cdot 10^{-3}$
382	$p_{и\,п1}$, Вт/мм^2	(6.389)	$489 \; 2 \; 115/(648 \cdot 2{,}2 \cdot 10^5) = 0{,}8 \; 10^{-3}$	$4985 \cdot 2 \cdot 225/(1094 \cdot 15{,}4 \times 10^5) = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$
383	$p_{л1}$, Вт/мм^2	(6 390)	$489 \cdot 2 \cdot 209/(648 \cdot 1{,}2 \cdot 10^5) = 2{,}6 \; 10^{-3}$	$4985 \cdot 2 \cdot 322/(1094 \cdot 6{,}2 \times 10^5) = 4{,}7 \; 10^{-3}$
384	v_2, м/с	(6 391)	$\pi \cdot 152{,}3 \cdot 1500/60\,000 = 12$	$\pi \cdot 420{,}2 \; 1000/60\,000 = 22$
385	$\Delta t_{п1}$, °С	(6 392) рис 6.25	$1{,}6 \; 10^{-3}/(10{,}4 \cdot 10^{-5}) = 15{,}4$	$(9{,}2 \cdot 10^{-3})/(12 \; 10^{-5}) = 76{,}7$
386	$\Delta t_{и\,п1}$, °С	(6 393) рис. 6 27	$0{,}8 \cdot 10^{-3}(0{,}25/(16 \cdot 10^{-5}) + (9{,}9 + 7{,}07)/(16 \; 130 \times 10^{-5})) = 1{,}9$	—
387	$b_и$, мм	§ 6 12	—	$(9{,}5 - 1 \cdot 3{,}35)/2 = 3{,}1$
388	$\Delta t_{и\,п1}$, °С	(6.394)	—	$1{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}1/(16 \; 10^{-5}) = 25{,}2$
389	$\Delta t_{л1}$, °С	(6.395)	$2{,}6 \; 10^{-3}/(10{,}4 \cdot 10^{-5}) = 25$	$4{,}7 \cdot 10^{-3}/(12 \; 10^{-5}) = 39$
390	$\Delta t_{и\,л1}$, °С	(6 396)	$2{,}6 \; 10^{-3} \cdot 18{,}5/(12 \cdot 130 \times 10^{-5}) = 7{,}1$	—
391	$\Delta t_{и\,л1}$, °С	(6.397)	—	$4{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}6/(16 \cdot 10^{-5}) = 17{,}6$

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
392	$\Delta t'_1$, °С	(6 398)	$(15{,}4 + 1{,}9)\ 2\ \ 115/648 + (25 + 7{,}1)\ 2\ \ 209/648 = 26{,}8$	$(76{,}7 + 25{,}2)\ 2\ \ 225/1094 + (39 + 17{,}6)\ 2\ \ 322/1094 = 75{,}2$
393	P'_Σ, Вт	(6.400) табл 6.24	$0{,}21(489 \cdot 2\ \ 115/648 + 243{,}6) + 489\ \ 2 \cdot 209/648 + 215 + 0{,}1\ \ 66{,}3 + 43 = 668$	—
394	P_Σ, Вт	(6 399) табл 6.24	—	$0{,}77(4985 \cdot 2\ \ 225/1094 + 1537) + 4985 \cdot 2\ \ 322/1094 + 5227 + 488 + 860 = 12\,270$
395	$\Delta t_в$, °С	(6 401) рис. 6.24	$668/(7\ \ 10^5\ \ 2{,}55 \cdot 10^{-5}) = 37{,}4$	$12\,270/(8{,}5 \cdot 10^5 \cdot 107 \cdot 10^{-5}) = 13{,}5$
396	Δt_1, °С	(6 402)	$26{,}8 + 37{,}4 = 64{,}2$	$75{,}2 + 13{,}5 = 88{,}7$
397	$P'_{м2}$, Вт	(6.403)	$3 \cdot 12{,}5^2\ \ 1{,}4\ \ 0{,}328 = 215$	$3 \cdot 155^2 \cdot 1{,}48\ \ 0{,}049 = 5227$
398	$S_{п2}$, мм^2	(6 404)	—	$\pi \cdot 420{,}2 \cdot 230 = 3\ \ 10^5$
399	$П_2$, мм	(6 405)	—	$2(44{,}3 + 5{,}18) = 100$
400	$S_{и\,п2}$, мм^2	(6 406)	—	$81\ \ 100\ \ 230 = 19 \cdot 10^5$
401	$S_{л2}$, мм^2	(6 407)	—	$4\pi\ \ 420{,}2\ \ 106{,}2 = 5{,}6 \cdot 10^5$
402	$p_{п2}$, Вт/мм^2	(6.408)	—	$5227\ \ 2 \cdot 230/(1121 \cdot 3\ \ 10^5) = 7{,}1 \cdot 10^{-3}$
403	$p_{и\,п2}$, Вт/мм^2	(6 409)	—	$5227\ \ 2\ \ 230/(1121 \cdot 19 \times 10^5) = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$
404	$p_{л2}$, Вт/мм^2	(6.410)	—	$5227 \cdot 2 \cdot 330{,}2/(1121 \cdot 5{,}6 \times 10^5) = 6 \cdot 10^{-3}$
405	$\Delta t_{п2}$, °С	(6 411) рис. 6 27	—	$7{,}1 \cdot 10^{-3}/(12{,}3 \cdot 10^{-5}) = 57{,}7$
406	$\Delta t_{и\,п2}$, °С	(6 412)	—	$1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}6/(16 \cdot 10^{-5}) = 11$
407	$\Delta t_{л2}$, °С	(6.413)	—	$6\ \ 10^{-3}/(12{,}3 \cdot 10^{-5}) = 48{,}8$
408	$\Delta t_{и\,л2}$, °С	(6 414)	—	$6 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}22/(1{,}6 \cdot 10^{-5}) = 8{,}25$
409	$\Delta t'_2$, °С	(6 415)	—	$(57{,}7 + 11) \cdot 2 \cdot 230/1121 + (48{,}8 + 8{,}25) \cdot 2 \times 330{,}2/1121 = 61{,}8$
410	Δt_2, °С	(6 416)	—	$61{,}8 + 13{,}5 = 75{,}3$
		Вентиляционный расчет		
411	$V_в$, м^3/с	(5—10)	—	$12\,270/(1100\ \ 2 \cdot 13{,}5) = 0{,}41$
412	k_1	(5—21)	—	$3{,}5\ \ (1000/1000)^{3/4} \cdot (0 + 100)/100 = 3{,}5$
413	$V'_в$, м^3/с	(5—20)	—	$3{,}5(420{,}2/100)^2\ \ 10^{-2} = 0{,}62$
414	H, Па	(5—22)	—	$7{,}85(1000/1000)^2 \cdot (420{,}2/100)^2 = 140$
415	$D_{копр}$, мм	§ 6.2 рис. 6.1	$2(132 - 6) = 252$	—
416	k_2	(5—24)	$2{,}2\ \ (1500/1000)^{3/4} \times (252/100)^{1/2} = 4{,}78$	—
417	$V_в$, м^3/с	(5—23)	$4{,}78\ \ 668/(1100 \cdot 37{,}4) = 0{,}04$	—
418	$V'_в$, м^3/с	(5—26)	$0{,}6 \cdot (1500/1000)(252/100)^3 \times 10^{-2} = 0{,}144$	—
419	Н, Па	(5—27)	$12{,}3\ \ (1500/1000)^2 \times (252/100)^2 = 175{,}7$	—

Масса двигателя и динамический момент инерции ротора

Последовательность расчета	Условные обозначения	Источник	Двигатель № 1	Двигатель № 2
420	$m_{м1}$, кг	(6.418)	$(7{,}55 + 1{,}35\ \ (1{,}405/1{,}32)^2) \cdot 36 \times (21/2)\ \ 648 \cdot 2\ \ 1{,}368\ \ 10^{-6} = 6{,}1$	—
421	$m_{м1}$, кг	(6.419)	—	$(7{,}55 + 1{,}35 \cdot (1{,}8 + 0{,}15) \cdot (3{,}35 + 0{,}15)/(5{,}667 \cdot 1))72 \cdot\ (17/2)1094 \times 2\ \ 5{,}667 \cdot 10^{-6} = 69{,}9$
422	$m_{л2}$, кг	(6 420)	$2{,}7[34 \cdot 95{,}9 \cdot 115 + 2\pi\ \ 121{,}7 \times 326 + 1{,}1 \cdot 11 \cdot (44 - 10{,}65)\ \ 26 \times 3]\ \ 10^{-6} = 1{,}77$	—
423	$m_{м2}$, кг	(6 421)	—	$8{,}9\ \ 81(2/2)1121 \cdot 58{,}56 \cdot 10^{-6} = 47{,}3$
424	$m_{c\Sigma}$, кг	(6 422)	$7{,}8\ \ 115 \cdot 0{,}97(0{,}785\ \ (233^2 - 54^2) - 36\ \ 137{,}6 - 34\ \ 95{,}5 - 0) \times 10^{-6} = 27{,}9$	$7{,}8\ \ 225\ \ 0{,}95(0{,}785(590^2 - 140^2) - 72\ \ 38\ \ 9{,}5 - 81\ \cdot 44{,}3 \times 5{,}18 - (\pi 40^2/4)12)\ \cdot 10^{-6} = 330$
425	$m_{и1}$, кг	(6.423)	$1{,}35(115 + 20)(2\ \ 18{,}5 + 3 \times 8{,}5)0{,}25\ \ 36\ \ 10^{-6} = 0{,}1$	—
426	$m_{и2}$, кг	(6 424)	—	$1{,}35\ \ 72[(225 + 20)(2{,}2 \cdot 38 + 4{,}5 \times 9{,}5) + 322(0{,}6\ \ 38 + 0{,}6\ \ 9{,}5)] \times 10^{-6} = 3{,}9$
427	$m_{и1}$, кг	(6 425)	—	$1{,}35 \cdot 81((230 + 20)(1{,}6 + 44{,}3 + 4{,}5 \cdot 5{,}18) + 330{,}7(1 \cdot 44{,}3 + 1 \times 5{,}18)) \cdot 10^{-6} = 4{,}4$
428	$m_к$, кг	(6.426)	$(0{,}6\ \cdot 233^2 \cdot\ 115 + 2{,}5\ \cdot 233^3) \times 10^{-6} = 35{,}4$	—
429	$m_к$, кг	(6.433)	—	$1{,}0 \cdot 590^2\ \ 225 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 590^{1{,}6} \times 10^{-3} = 431$
430	$m_{дв}$, кг	(6 436)	$6{,}1 + 1{,}77 + 27{,}9 + 0{,}1 + 35{,}4 = 71{,}3$	—
431	$m_{дв}$, кг	(6 437)	—	$69{,}6 + 47{,}3 + 330 + 3{,}9 + 4{,}4 + 431 = 886$
432	$J_{и\,д}$, кг м^2	(6.417)	$0{,}65\ \cdot 152{,}3^4\ \cdot 115\ \ 10^{-12} = 0{,}04$	$0{,}65\ \ 420{,}2^4 \cdot 230 \cdot 10^{-12} = 4{,}9$

Механический расчет вала

Вал асинхронного двигателя (100 кВт, 1470 об/мин), соединенный с приводимым механизмом упругой муфтой: $D_{н2}$ = 288 мм; l_2 = 330 мм; δ = 1 мм; муфта — тип МУВП 1—70 (см. Приложение 23); m = 38,5 кг; L = 288 мм; r = 95 мм. Размеры вала (см. рис. 6.29), мм· d_1 = 70; d_2 = 75, d_3 = 87; d_4 = 95; d_5 = 90; d_6 = 87; d_7 = 75; c = 120; y_1 = 45; y_2 = 125; y_3 = 165, b = 330; a = 370, l = 700; x_1 = 45, x_2 = 125; t = 7,5 (см. табл. 1.3); сталь 45.

Определение $S_а$, $S_б$ и S_0 по табл. 6.24.

Параметр	Источник	Расчет
G'_2, Н	(6.438)	$64 \cdot 288^2 \cdot 330\ \ 10^{-6}$=1752
$f_т$, мм	(6.439)	$1752(370^2 \cdot 11{,}128+330^2 \cdot 15{,}846)10^6/(3\ \ 2{,}06 \cdot 10^{11}\ \ 700^2)$=0,0188
M_2, Н м	(6 440)	$9{,}55\ \ 100\ \ 10^3/1470$=650
$F_п$, мм	(6 441)	$(0{,}3 \cdot 650/95)10^3$=2053

Параметр	Источник	Расчет
$f_п$, мм	(6 442)	2053 120[(1,5 700 0,03443—11,128) 370+330 15,846] × × 10^6/(3 2,06 10^{11} 700^2)=0,0118
e_0, мм	(6.443)	0,1 1+0,0188+0,0118=0,1306
T_0, Н	(6 444)	0,15 288 · 300 0,1306/1=1692
f_0, мм	(6.445)	0,0188 1692/1752=0,0182
$f_м$, мм	(6.446)	0,0182/(1—0,0182/0,1306)=0,0211
f, мм	(6.447)	0,0188+0,0118+0,0211=0,0517 (менее допустимого значения f=0,1 · 1=0,1 мм)
f_c, мм	(6.448)	0,0118 9,81 38,5/(2 2053)=0,0011
$n_{кр}$, об/мин	(6.450)	950[(1—0,0182/0,1306)/(0,0188+0,0011)]$^{1/2}$=6248 (больше минимального допустимого значения $n_{кр}$=1,3 1470=1911 об/мин)
z_1, мм	(6 452)	288/2+58/2=173
$M_{и(с)}$, Н м	(6.451)	2(2053+9,81 38,5/2)173 10^{-3}=776
$M_к$ Н · м	(6.453)	2 · 650=1300
ω, мм^2	(6 454)	0,1(70—7,5)^3=24 414
$\sigma_{пр}$, Па	(6 455)	(776^2+1300^2)$^{1/2}$$10^9$/24414 ≈ 62 10^6 (меньше максимально допустимого для стали марки 45 значения $\sigma_т$=0,7 350 10^6=245 10^5 Па)

Расчет подшипников качения

Подшипники рассчитывают по данным, указанным в примере расчета вала (см. § 6.14). При этом принимаем нагрузку с умеренными толчками ($k_б$ = 1,5); подшипник со стороны А — шариковый; со стороны В — роликовый; аксиальная нагрузка отсутствует; расчетный срок службы подшипников 12 000 ч; наибольшая частота вращения 1500 об/мин.

Параметр	Источник	Расчет параметров
$R_А$, Н	(6.456)	(1752 + 1692) 330/700 + 2053 120/700 = 1975
$Q_А$, Н	(6.458)	1,5 1975 = 2962
C, Н	(6 463)	(2962/25,6) · (12 000 1500)$^{1/3}$ = 30 300
$R_В$, Н	(6.457)	(1752 + 1692) 370/700 + 2053 (700 + 120)/700 = 4220
$Q_В$, Н	(6.458)	1,5 4220 = 6330
C, Н	(6 464)	(6330/18,5) · (12 000 1500)^{0,3} = 51 620

Из Приложения 22 для стороны А выбираем шарикоподшипник № 215 легкой серии со значением C = 51 000 (с запасом надежности), для стороны В — роликоподшипник № 2215 легкой узкой серии со значением C = 76 500 (с запасом надежности)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Асинхронные** двигатели общего назначения/Под ред. В. М. Петрова и Л. Э. Кравчика. — М.: Энергия, 1980. — 488 с.

2. **Видеман Е., Келленбергер В.** Конструкция электрических машин. — Л.: Энергия, 1972. — 520 с.

3. **Виноградова А. А., Демусяк А. Г.** Международная стандартизация в области электротехники и радиоэлектроники. — М.: Энергия, 1974. — 205 с.

4. **Вольдек А. И.** Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974. — 839 с.

5. **Воскресенский А. П., Мазия Л. В., Сорокер Т. Г.** Основные принципы системы автоматического проектирования асинхронных двигателей. — Электротехника, 1978, № 9, с. 14 — 18.

6. **Гольдберг О. Д.** Теоретическая и экспериментальная разработка методов расчета показателей надежности, ускоренных испытаний и контроля качества асинхронных двигателей, докторская диссертация. М., 1972. — 355 с.

7. **Гольдберг О. Д.** Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. — М.: Знание, 1976. — 55 с.

8. **Готтер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 480 с.

9. **Гурин Я. С, Кузнецов Б. И.** Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978. — 479 с.

10. **Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1974. — 503 с.

11. **Ермолин Н. П., Жерихин И. П.** Надежность электрических машин. — Л.: Энергия, 1976. — 247 с.

12. **Копылов И. П.** Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах. — М.: Высшая школа, 1980. — 258 с.

13. **Костенко М. П., Пиотровский Л. М.** Электрические машины, ч. 1. — М.: Энергия, 1972. — 815 с.; ч. II. — М.: Энергия, 1972. — 712 с.

14. **Проектирование** электрических машин./Копылов И. П.; Горяинов Ф. А.; Клоков Б. К. и др. — М.: Энергия, 1980. — 495 с.

15. **Сорокер Т. Г., Воскресенский А. П., Мордвинов Ю. В.** Применение ЦВМ для расчета и исследований асинхронных двигателей. Труды 3-й научно-технической конференции. — М.: ВНИИЭМ, 1971, с. 131 — 144.

16. **Сорокер Т. Г., Мордвинов Ю. В.** Международная стандартизация низковольтных асинхронных двигателей по мощности и установочным размерам. — Электротехника, 1978, № 9, с. 7 — 9.

17. **Стрельбицкий Э. К.** Оптимальное проектирование асинхронных двигателей. — В кн.: Асинхронные двигатели, гл. 3/Под ред. В. М. Петрова и А. Э. Кравчика. — М.: Энергия, 1980, с. 83 — 108.

18. **Стрельбицкий Э. К., Максимов Е. Н.** Оценка технического уровня асинхронных двигателей на стадии проектирования. — Электротехника, 1978, № 9, с. 12 — 14.

ЧАСТЬ II
Переходные процессы в электрических машинах

При всяких изменениях в режимах работы (пуск, торможение, включения и отключения отдельных цепей, изменение нагрузки и т. п.), а также при аварийных ситуациях, например, при коротких замыканиях, в электрических машинах и связанных с ними электрических цепях протекают сложные переходные процессы.

Возникновение переходных процессов в электрических машинах обусловлено изменением количества электромагнитной энергии в их электрических и магнитных цепях и механической энергии вращающихся масс в процессе перехода от одного установившегося режима к другому. В этот период в электрической машине происходит накопление или рассеяние энергии, от количества которой зависит продолжительность протекания переходных процессов. Чем больше запас энергии в цепи, тем длительнее протекают переходные процессы в ней. Протекание переходных процессов в электрической машине не может быть мгновенным, а всегда связано с определенным конечным промежутком времени.

Длительность переходных процессов невелика, однако от характера их протекания во времени в значительной мере зависит надежность работы электрических машин в эксплуатации. В особенности велико значение этих процессов в крупных машинах. В этой связи необходимо уделять внимание переходным процессам, выбору средств защиты электрических машин от токов короткого замыкания, вопросам регулирования напряжения генераторов, пуска в ход, торможения, реверсирования, регулирования частоты вращения и отключения двигателей.

Во многих случаях характер переходных процессов определяет выбор установленной мощности, массы и электромагнитных нагрузок электрических машин. В частности, при проектировании

машин, работающих в переходных режимах, важно правильно рассчитать потери и распределение активной и реактивной мощности.

Теория переходных процессов в электрических машинах к настоящему времени разработана весьма глубоко в трудах отечественных и зарубежных ученых, в частности, М. П. Костенко, Г. Н. Петрова, И. П. Копылова, А. В. Иванова-Смоленского, Г. А. Сипайлова, А. И. Важнова, Н. П. Ермолина, И. И. Трещева, М. З. Жица, Е. Я Казовского, И. М. Постникова, Л. Н. Грузова, Р. Рюденберга, К. П. Ковача и других и отражена в ряде трудов и учебных пособий для студентов вузов, аспирантов и инженеров-исследователей.

В связи с ограниченностью объема в данном учебнике основное внимание уделено вопросам уяснения физической сущности переходных процессов в электрических машинах и решения некоторых практических задач. Основные разделы иллюстрированы примерами расчета переходных процессов, в том числе с применением программируемых калькуляторов и персональных компьютеров.

Глава 1
МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Общие положения

Для установившегося режима работы электрических машин характерными являются следующие режимы: холостого хода (х.х.), номинальный и короткого замыкания (к.з.).

При изменениях режимов работы, величины напряжения и частоты на выводах машины, нагрузки на валу, включениях, отключениях и изменениях параметров цепи, коротких замыканиях и пр. в электрических машинах (ЭМ) протекают сложные электромагнитные и механические переходные процессы, связанные с накоплением или рассеянием электромагнитной и механической энергии.

Сложность аналитических исследований переходных процессов ЭМ обусловлена тем, что эти процессы обычно протекают при одновременном изменении нескольких факторов, от сочетания которых зависит их характер. Существенное влияние оказывают также нелинейность кривой намагничивания, зависимость параметров ЭМ от нагрузки, появление вихревых токов в массивных частях магнитопровода, взаимное влияние электромагнитных и механических процессов и т. п.

Таким образом, электрическая машина, связанная с электрической сетью, является сложным комплексом пространственных электрических и магнитных полей в неоднородной среде, образованным

тесно переплетающимися участками с различными магнитными и диэлектрическими постоянными.

Учет всех этих сложных взаимосвязей приводит к необходимости составления систем нелинейных уравнений и чрезвычайно затрудняет задачу аналитического исследования переходных процессов в ЭМ.

В этой связи возникает необходимость вводить упрощающие допущения, облегчающие решение задачи, при условии сохранения приемлемой точности получаемых результатов. В ряде случаев представляется возможным пренебречь влиянием отдельных факторов, например, насыщением магнитной системы, влиянием гистерезиса, вихревых токов и потерь в стали, вытеснением тока в меди обмоток, несинусоидальностью распределения в пространстве МДС и магнитных индукций и пр.

Все переходные процессы можно подразделить на две группы:

1) электромагнитные — протекающие при практически неизменной частоте вращения (сброс и увеличение нагрузки, внезапное к.з., коммутационные явления);

2) электромеханические — протекающие при значительном изменении частоты вращения (пуск, реверс, торможение и т. п.).

В общем случае уравнения, описывающие переходные процессы в ЭМ, являются нелинейными и могут быть записаны в дифференциальной или операторной форме.

Выбираемая форма записи этих уравнений должна обеспечить наибольшую простоту и точность.

При анализе различных режимов работы и переходных процессов в ЭМ принято пользоваться как физическими единицами (Вольт, Ампер, Ом и т. д.), так и относительными, безразмерными единицами, выраженными в долях их некоторых количеств, имеющих ту же физическую размерность. Последние носят название базисных величин.

Уравнения ЭМ обычно записывают не в абсолютных значениях, а в относительных единицах, что позволяет получить их более простыми по виду, облегчить контроль за правильностью расчетов и сопоставление поведения различных по мощности и типам машин.

Общепринятыми базисными величинами являются, например:

— ток статора $I_б$ (за базисный ток статора принимают амплитуду номинального фазного тока статора);

— напряжение статора $U_б$ (за базисное напряжение статора принимают амплитуду номинального фазного напряжения);

— угловая частота $\omega_б$ (за базисную угловую частоту принимают синхронную угловую частоту $\omega_1 = 2\pi f_1$);

— базисное сопротивление статора $Z_б = U_б / I_б$ и т. п.

Как видно из этих примеров, базисные величины тока и напряжения выбраны произвольно, а базисное сопротивление получается из

первых двух. При выбранных базисных условиях относительные значения ЭДС, напряжения, тока, сопротивления будут определяться соотношением

$$E_{(б)*}=E/U_б;\ U_{(б)*}=U/U_б;\ I_{(б)*}=I/I_б;\ Z_{(б)*}=Z/Z_б.$$

Звездочка указывает, что величина выражена в относительных единицах, а индекс (б) — что она приведена к базисным условиям. Эти индексы, как и некоторые другие, часто опускают, если смысл выражения ясен из текста.

Для выполнения расчетов в относительных единицах нужно все ЭДС и сопротивления элементов схемы выразить в относительных единицах, при выбранных базисных условиях, например $E_{(б)*}=E_{(н)*}U_н/U_б$.

При $U_б=U_н$ пересчет относительных ЭДС не требуется ($E_{(б)*}=E_{(н)*}$).

1.2. Возникновение переходных процессов и законы коммутации

При изменениях параметров электрической цепи, связанных с коммутацией (включением, отключением и переключением ветвей), при коротких замыканиях отдельных участков и т. п. в ней возникают переходные процессы, связанные с накоплением или рассеянием электромагнитной энергии, заканчивающиеся спустя некоторое время после коммутации.

Согласно закону электромагнитной индукции, сформулированному Фарадеем в 1831 г., количественная связь между изменяющимися по времени магнитным потоком Φ, пронизывающим замкнутый проводящий контур, и индуктируемой в этом контуре ЭДС выражается уравнением

$$E=-\frac{d\Phi}{dt}. \tag{1.1}$$

Положительное направление ЭДС E и вектора магнитной индукции B подчиняются правилу буравчика.

Если контур состоит из W витков, пронизываемых различными потоками, то ЭДС контура определяется суммой ЭДС отдельных витков контура, т. е.

$$E=-\left(\frac{d\Phi_1}{dt}+\frac{d\Phi_2}{dt}+\ldots+\frac{d\Phi_w}{dt}\right)=-\frac{d(\Phi_1+\Phi_2+\ldots+\Phi_w)}{dt}. \tag{1.2}$$

Сумма потоков, сцепленных со всеми витками контура, называется потокосцеплением, т. е. $\psi=\Sigma\Phi_w w$.

Если все витки контура сцеплены с одним и тем же потоком Φ, то

$$\psi = \Phi w, \tag{1.3}$$

тогда

$$E = -\frac{d\psi}{dt}. \tag{1.4}$$

Следовательно, ЭДС, индуктированная в замкнутом контуре, пропорциональна скорости изменения потокосцепления этого контура и имеет обратный знак.

Явление, когда ЭДС наводится в результате изменения магнитного потока (потокосцепления), создаваемого током того же самого контура, носит название *самоиндукции*. Коэффициент пропорциональности L между током i, создающим магнитное поле контура, и потокосцеплением Ψ называется *индуктивностью*

$$\psi = Li. \tag{1.5}$$

Если величина L для данной цепи постоянна, то

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -L\frac{di}{dt}. \tag{1.6}$$

Знак «минус» указывает, что при возрастании тока, когда $di/dt > 0$, ЭДС самоиндукции направлена против тока. При $di/dt < 0$ ЭДС совпадает по направлению с током.

Если две цепи (катушки) расположены рядом, то всякое изменение тока в первой цепи вызовет изменение пронизывающего вторую цепь магнитного потока и появление в ней индуктированной ЭДС, и наоборот. Это явление называется *взаимной индукцией*. В этом случае коэффициент взаимной индукции

$$M = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{\psi_{12}}{i_1}. \tag{1.7}$$

Возникающая благодаря взаимной индукции ЭДС будет равна

$$E_2 = -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -M\frac{di_1}{dt}, \tag{1.8}$$

$$E_1 = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -M\frac{di_2}{dt}. \tag{1.9}$$

Явление взаимной индукции лежит в основе принципа действия трансформатора.

При анализе переходных процессов в электрических машинах и трансформаторах используют **принцип постоянства потокосцепления.**

По законам коммутации электрических цепей в любой ветви с индуктивностью ток и магнитный поток в момент коммутации сохраняют те значения, которые они имели до коммутации, и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений. С энергетической точки зрения невозможность мгновенного изменения тока в индуктивности (или напряжения на конденсаторе) объясняется невозможностью скачкообразного изменения запасенной в них энергии ($Li^2/2$ или $CU^2/2$). Скачкообразное изменение энергии привело бы к выделению в индуктивности (или емкости) бесконечно большой мощности, что противоречит физической сущности явления.

Если принять активное сопротивление замкнутого контура равным нулю, то его потокосцепление остается постоянным в любом режиме:

$$E = -d\psi/dt.$$

Действительно, если замкнутый электропроводящий контур с сопротивлением R введем в магнитный поток Φ, образующий потокосцепление Ψ, то по закону электромагнитной индукции в нем наведется ЭДС, равная $E = -d\Psi/dt$, которая вызовет ток i и связанный с ним магнитный поток самоиндукции и соответственно потокосцепление Ψ_L контура с этим потоком. В результате возникнет ЭДС самоиндукции E_L, равная

$$E_L = -\frac{d\psi_L}{dt}. \qquad (1.10)$$

По второму закону Кирхгофа для этого контура можно написать

$$E + E_L = iR. \qquad (1.11)$$

Если принять $R = 0$, то

$$\frac{d}{dt}(\psi + \psi_L) = 0 \qquad (1.12)$$

и, следовательно, $\psi + \psi_1 = \psi_0 = \text{const}$; где Ψ_0 — потокосцепление контура в начальный период.

Таким образом суммарное потокосцепление замкнутого контура с идеальной проводимостью остается постоянным при любых условиях.

Так как активные сопротивления обмоток электрических машин и трансформаторов весьма малы по сравнению с индуктивными, то можно считать, что при внезапных к.з. они практически не влияют

на величины начальных токов и вызывают лишь затухание свободных токов, не поддерживаемых внешними ЭДС, т. е. можно положить $R=0$ и считать эти цепи сверхпроводящими. В этом случае при $R=0$ для цепи, не содержащей посторонних источников ЭДС, можно записать уравнение

$$-\frac{d\psi}{dt}=Ri=0, \tag{1.13}$$

т. е. полное потокосцепление Ψ сверхпроводящего контура остается постоянным. Следовательно, если эту цепь вводить в постоянное внешнее магнитное поле, то благодаря возникающему потокосцеплению Ψ_1 в ней будет индуктироваться ЭДС и появится ток такой величины и знака, что созданное этим током потокосцепление Ψ_2 полностью скомпенсирует потокосцепление Ψ_1.

Потокосцепление контура остается постоянным и при наличии сопротивления, но только в начальный момент нарушения режима, в течение относительно малого промежутка времени.

При практических расчетах переходных процессов в электрических машинах в ряде случаев представляется возможным без существенных погрешностей полагать электрические цепи линейными и использовать принцип наложения, согласно которому действительный режим можно рассматривать как результат наложения ряда условных режимов, каждый из которых определяется в предположении, что в схеме приложена только одна (или группа) ЭДС, в то время как остальные равны нулю, при этом все элементы схемы остаются включенными.

1.3. Математические методы анализа переходных процессов

Основной задачей изучения переходных процессов является определение токов в обмотках машины при изменении режимов ее работы. При этом, как и в случае установившихся режимов, необходимо составить и решить систему уравнений равновесия ЭДС в электрических цепях машины совместно с уравнением движения ротора. Задача осложняется нелинейностью системы.

В связи с тем что механическое движение ротора, вследствие инерции, происходит значительно медленнее, чем процессы в электрических цепях, решение задачи разделяют на два этапа:

— определение токов и моментов вращения при заданном начальном движении ротора;

— по найденным значениям тока и момента определяют характер движения ротора.

Переходные режимы ЭМ подразделяют на два вида:

— переходные режимы, при которых частота вращения ротора

может быть принята неизменной (электромагнитные переходные процессы);

— переходные электромеханические процессы, в которых учет изменения частоты вращения представляет особую важность (например, пуск синхронных двигателей, синхронизация и ресинхронизация двигателей и генераторов, качания, пуск и реверс двигателей асинхронных и постоянного тока и пр.).

Часто задачи переходных процессов связаны с составлением и решением системы дифференциальных уравнений линейных или линеаризованных. Для решения этих уравнений можно использовать классический или операторный метод, а иногда целесообразно сочетать оба метода.

Решение системы уравнений классическим методом представляется в виде суммы решений для установившегося и переходного процессов.

Установившийся процесс находят частным решением системы, которое имеет тот же вид, что и заданная функция в правой части уравнения.

Переходный процесс находят решением однородной системы, т. е. когда правые части равны нулю. Чтобы решить одонородную систему, нужно составить характеристическое уравнение определителя системы и найти его корни.

Решение для уравнения m-го порядка имеет вид

$$\sum_{k=1}^{k=m} A_k e^{p_k t},$$

где e — основание натуральных логарифмов; p_k — корень характеристического уравнения.

Неопределенные коэффициенты A_x определяют из начальных условий. Операторный метод можно применить для сведения системы дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений. Полученное операторное уравнение по известным правилам можно преобразовать в функцию времени по Лапласу. Если известна какая-либо функция $\varphi(t)$, то ее изображение $\varphi(p)$ можно найти из уравнения

$$\bar{\varphi}(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} \varphi(t) dt,$$

где $\varphi(t)$ называется оригиналом изображения.

Это уравнение обычно записывается в виде $\bar{\varphi}(p) \div \varphi(t)$ или $\varphi(t) \div \varphi(p)$.

Преобразование Лапласа по Карсону отличается от обычного множителем p. Для нахождения оригинала по его изображению пользуются таблицами или формулой разложения Хэвисайда.

Операторным методом особенно удобно пользоваться при нулевых начальных условиях.

1.3.1. Переходные процессы при включении неподвижных контуров

Включение неподвижного контура с индуктивностью L и активным сопротивлением R под постоянное напряжение. Связь между приложенным напряжением и возникшим током выражается уравнением

$$U=iR+L\frac{di}{dt} \text{ или } U=i(R+pL);\ i=\frac{U}{R+pL}=\frac{U}{L(p+\alpha)}=\frac{U}{R}\cdot\alpha/(p+\alpha).$$

Операторному выражению $\alpha/(p+\alpha)$ соответствует функция времени

$$\alpha/(p+\alpha)\doteqdot 1+e^{\alpha t}, \quad \text{следовательно,} \quad i=\frac{U}{R}(1-e^{-\alpha t}),$$

где $\alpha=\frac{R}{L}$; $\frac{1}{\alpha}=\tau$ — постоянная времени электрической цепи.

Включение неподвижного контура с индуктивностью L и активным сопротивлением R под переменное напряжение. Представим переменное напряжение в комплексной форме

$$\dot{U}=Ue^{j(\omega t+\psi)}=U[\cos(\omega t+\psi)+j\sin(\omega t+\psi)],$$

тогда

$$Ue^{j(\omega t+\psi)}=iR+L\frac{di}{dt},$$

или в операторной форме

$$i(R+pL)=Ue^{j(\omega t+\psi)};$$

отсюда

$$i=Ue^{j(\omega t+\psi)}/(R+pL)=Ue^{j\psi}/L[e^{j\omega t}/(p+\alpha)].$$

Оригиналом этого выражения является

$$i(t)=[U/\sqrt{(\omega L)^2+R^2}]\cdot[\cos(\omega t+\psi-\varphi)-\cos(\psi-\varphi)e^{-\alpha t}],$$

где $\varphi=\operatorname{arctg}(\omega L/R)$.

1.3.2. Включение магнитосвязанного контура (при замкнутом вторичном контуре) на постоянное напряжение

Уравнение ЭДС в операторной форме

$$U_1 = i_1 R_1 + p\psi_1; \qquad \psi_1 = i_1 L_1 + i_2 L_2;$$

$$0 = i_2 R_2 + p\psi_2; \qquad \psi_2 = i_2 L_1 + i_1 L_2;$$

отсюда

$$i_2 = -i_1 [pL_{21}/(R + pL_2)];$$

или, подставляя i_2 в первое уравнение, получим:

$$U_1 = i_1 R_1 + p(i_1 L_1 + i_2 L_{12}) = i_1 [R_1 + p(L_1 - pL_{12}^2)/(R_2 + pL_2)],$$

или

$$U_1 = i_1 [R_1 + pL_1(p)].$$

Индуктивность

$$L_1(p) = (L_1 - pL_{12}^2)/(R_2 + pL_2)$$

называется *операторной индуктивностью*, ее можно представить в виде

$$L_1(p) = L_1'(p + \alpha_2)/(p + \alpha_{20}),$$

здесь $L_1' = L_1 - L_{12}^2/L_2$ — переходная эквивалентная индуктивность первого контура при короткозамкнутом сверхпроводящем втором контуре ($R_2 = 0$); $\alpha_2' = R_2/L_2'$; $\alpha_{20} = R_2/L_1$ — условные декременты; L_1 и L_2 — полные индуктивности 1-го и 2-го контуров; $\tau_2' = 1/\alpha_2'$ — условная постоянная времени переходного тока; $\tau_{20} = 1/\alpha_{20}$ — постоянная времени 2-го контура при разомкнутом первом контуре.

Или в другом виде

$$L_1(p) = L_1(R_2 + pL_2')/(R_2 + pL_2).$$

Подставляя это значение $L_1(p)$ в U_1 и решая его, получим:

$$i = \frac{U}{R_1}\left[1 + \frac{\alpha_1' + P_2}{P_1 + P_2} e^{p_1 t} - \frac{\alpha_1' + P_1}{P_1 + P_2} e^{p_2 t},\right.$$

где корни характеристического уравнения

$$P_1 \simeq -\alpha_{20}\alpha_1'/(\alpha_1' + \alpha_2'); \; P_2 \simeq -(\alpha_1' + \alpha_2') - P_1.$$

Анализируя эти корни, можно увидеть, что абсолютная вели-

чина P_1 мала (большая постоянная времени), а P_2 — большая (малая постоянная времени), т. е.

$$\tau_1 = \frac{1}{P_1} \approx \frac{L_1 + L_2}{(R_1 + R_2')/2}; \quad \tau_2 \approx \frac{1}{P_2} \approx \frac{L_{1б} + L_{2б}}{(R_1 + R_2)}.$$

Подставляя приближенное значение корней и учитывая, что $-(\alpha_1' + P_1) = P_2 + \alpha_2'$, получим

$$i_1(t) = \frac{U}{R_1}\left[1 - \left(\frac{\tau_{10}}{\tau_{10} + \tau_{20}} e^{p_1 t} + \frac{\tau_{20}}{\tau_{10} + \tau_{20}} e^{p_1 t}\right)\right].$$

Вторичный ток

$$i_2 = i_1 \frac{PL_{21}}{R_2 + PL_2} = \frac{U}{L_1'} \cdot \frac{1}{(1 + \sigma_2)}\left(\frac{e^{p_1 t}}{P_1 - P_2} - \frac{e^{p_2 t}}{P_1 - P_2}\right).$$

Намагничивающий ток $i_\mu = i_1 + i_2 \approx \frac{U}{R_2}(1 - e^{p_1 t})$.

При включении магнитосвязанного контура на переменное напряжение можно положить $R = R_k$ и $L'_1 = L_k$, тогда задача сводится к процессу включения простой цепи с R_k и L_k.

1.3.3. Переходные процессы при включении и выключении вращающихся магнитосвязанных контуров

При вращающемся роторе угловые частоты свободного вторичного тока отличаются от частот токов статора на величину угловой частоты вращения ротора

$$\dot{\lambda}_2 = \dot{\lambda} - \omega_2.$$

Имея в виду, что свободные токи $i_{1c} = \dot{I}_{1c} e^{j\lambda t}$; $i_{2c} = \dot{I}_{2c} e^{j(\lambda - \omega_2)t}$, получим систему уравнений:

$$\dot{I}_{1c}(R_1 + j\dot{\lambda}L_2) + \dot{I}_{2c} j\dot{\lambda}L_m = 0;$$

$$\dot{I}_{1c} j(\dot{\lambda} - \omega_2)L_m + I_{2c}[R_2 + j(\dot{\lambda} - \omega_2)L_2] = 0.$$

Решая ее, найдем

$$i_{1c} = A_1 e^{-\rho_1 t} + A_2 e^{-\rho_2 t} \cdot e^{j\omega_2 t};$$

$$i_{2c} = B_1 e^{-\rho_1 t} \cdot e^{-j\omega_2 t} + B_2 e^{-\rho_2 t}.$$

При малых значениях ω_2, например $\omega_2=0$ (случай включения в сеть машины с неподвижным ротором и замкнутой вторичной обмоткой), возникают только асимметричные свободные токи, абсолютная величина одного из декрементов большая (малая постоянная времени), определяется индуктивностью рассеяния обмоток, а второго декремента — малая (большая постоянная времени) и определяется величиной индуктивности, близкой к сумме полных индуктивностей первичной и вторичной обмоток.

Постоянные A_1 и A_2 находят из начальных условий. При включении асинхронной машины в сеть с напряжением U_1:

$$i_1=i_1'+i_1''=\dot{I}_1\,\mathrm{e}^{j\omega t}-(\dot{\psi}_{10}/L_1')\mathrm{e}^{-p_1t}+(\dot{\psi}_{10}/L_1'-\dot{I}_1)\mathrm{e}^{-p_2t}\cdot\mathrm{e}^{j\omega_2t};$$

$$i_2=i_2'+i_2''=\dot{I}_2\mathrm{e}^{j\omega t}+(L_m/L_2)(\dot{\psi}_{10}/L_1')\mathrm{e}^{-(p_1+\omega_2)t}-[(L_m/L_2')(\dot{\psi}_{10}/L_1')+\dot{I}_{20}]\mathrm{e}^{-p_2t}.$$

Здесь вторичный ток приведен к частоте статора.

1.3.4. Преобразование координат

При вращении ротора взаимоиндуктивность обмоток статора и ротора изменяется по синусоидальному закону

$$M=M_{\max}\cdot\cos\omega_2t,$$

где $M_{\max}$ — максимальная взаимоиндукция при совпадении осей обмоток статора и ротора; ω_2 — угловая частота вращения ротора.

Система уравнений имеет вид

$$U_1=i_1R_1+\frac{d}{dt}\psi_1;\quad \psi_1=i_1L_1+i_fM;$$

$$U_f=i_fR_f+\frac{d}{dt}\psi_f;\quad \psi_f=i_fL_f+i_1M.$$

В связи с переменными коэффициентами решение этой системы затруднительно. Более простое решение можно получить в результате применения метода преобразования координат.

Так, например, 3-фазную систему статора синхронной машины можно привести к 2-фазной системе ротора, при этом токи фаз можно представить в виде пространственных векторов, направленных по осям фаз. Модули векторов равны мгновенным значениям токов.

Если спроектировать вектора фазных величин на взаимно перпендикулярные оси α и β (рис. 1.1), то получим

$$i_\alpha=(2/m_1)\sum_{n=1}^{n=m} i_n\cos(2\pi n/m_1);$$

$$i_\beta=(2/m_1)\sum_{n=1}^{n=m} i_n\sin(2\pi n/m_1).$$

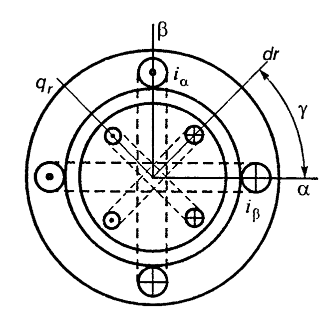


Рис. 1.1. Схема координатных осей электрической машины

Посредством множителя $2/m_1$ токи i_α и i_β выражаются в масштабе фазного тока. В общем случае, когда $\sum_{n=i}^{n=m} i_n\neq 0$, появляется нулевая составляющая $i_0=(I/m)\sum i_n$.

Для трехфазной машины:

$$i_\alpha=(2/3)[i_A-(i_B+i_C)/2];$$

$$i_\beta=(2/3)[(\sqrt{3}/2)(i_B-i_C)];$$

$$i_0=(1/3)(i_A+i_B+i_C).$$

При обратном преобразовании, когда $i_A+i_B+i_C=0$:

$$i_A=i_\alpha;\ i_B=-(1/2)i_\alpha+(\sqrt{3}/2)i_\beta;\ i_C=-(1/2)i_\alpha-(\sqrt{3}/2)i_\beta.$$

Аналогичные уравнения преобразования справедливы и для напряжений и потокосцеплений.

Для двухфазной машины токи i_α, i_β будут ее действительными фазными величинами. Если ротор имеет m_2 симметричных фаз, то его аналогично можно привести к случаю двух фаз α_2, β_2 или к осям d и q, связанным с полюсной системой. Следовательно, такую машину, имеющую две фазы статора α и β, сдвинутые на 90° (эл. град.), и две фазы ротора d и q можно рассматривать как обобщенную машину.

Пространственные вектора тока, потокосцепления и напряжения статора проектируют на оси координат и получают

$$i_d=i_\alpha\cdot\cos\gamma+i_\beta\sin\gamma;\ i_q=-i_\alpha\cdot\sin\gamma+i_\beta\cos\gamma.$$

В некоторых случаях, например при несимметричных режимах, целесообразно вводить комплексные изображения векторов тока статора в осях α и β и ротора в осях d и q и разложить эти вектора на составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности.

Для приведения векторов к неподвижной системе координат надо умножить их на $e^{i\omega_k t}$

$$U_s=\dot{U}_{sk}e^{j\omega_k t};\ i_s=\dot{I}_{sk}e^{j\omega_k t}\text{ и т. д.}$$

Общие выводы по методу преобразования координат:

1. При симметричной m_1 фазной обмотке статора, когда угловая частота ω_1 задана как параметр, фазные токи, напряжения и потокосцепления могут быть представлены в виде:

— вещественных функций времени мгновенных фазных величин, например для фазы A, при синусоидальных токах и напряжениях

$$i_A = I_A \sin(\omega t - \varphi);\ u_A = U_A \sin(\omega t + \alpha);$$

— комплексных функций мгновенных значений фазных величин

$$i_A = \dot{I}_A e^{j\omega t};\ u_A = \dot{U}_A e^{j\omega t};$$

— пространственных векторов, представляющих суммарные МДС всех фаз.

В общем случае токи могут быть записаны в виде

$$i_s = \dot{I} e^{j\lambda t},$$

где i_s — пространственный вектор, изображающий ток МДС или линейную нагрузку, λ — комплексная угловая частота, подлежащая определению.

2. При симметричной m_2-фазной обмотке ротора аналогичная запись справедлива, но частота соответствующих составляющих токов ротора отличается на частоту скольжения.

3. Система d, q, 0 наиболее приемлема к явнополюсной синхронной машине с электрической и магнитной несимметрией.

Переход к системе d, q, 0 возможен или непосредственным проектированием пространственных векторов фазных величин на оси d, q, или преобразованием m-фазной системы в систему α, β, 0 с последующим проектированием векторов этой системы на оси d и q, или переходом от фазных величин статора к системе прямо и обратно вращающихся обобщенных векторов с последующим их проектированием на оси d и q.

4. Необходимо различать мгновенные комплексные временные вектора, представляющие собой обобщенную комплексную запись синусоидальной функции, и пространственные вектора, вращающие пространственную синусоиду МДС с соответствующей угловой частотой в прямом и обратном направлении.

Если заданы временные комплексные вектора фазных токов 3-фазной системы, то, пользуясь известными формулами, можно найти их симметричные составляющие и пространственные вектора МДС.

1.3.5. Отключение индуктивно связанных контуров

При отключении индуктивных контуров от сети путем к.з. их зажимов переходные процессы протекают аналогично рассмотренным ранее случаям включения, поскольку к.з. можно рассматривать как включение внешнего напряжения, равного и обратного по знаку тому, которое было до к.з. Разница будет только в установившихся значениях величин.

При отключении постоянного тока получим $i=(U/R)e^{-\alpha t}$.

Потокосцепление статора затухает по закону $\psi_s=\psi_{s0}e^{-\alpha_{20}t}$; $\alpha_{20}=1/\tau_{20}=R_2/L_2$.

При отключении контуров размыканием цепи может возникнуть перенапряжение

$$U=U_{\text{ном}}\sqrt{1+(\alpha_{20}/\omega)^2}\cdot e^{-\alpha_{20}t}.$$

При больших сопротивлениях вторичной цепи (ротора) вследствие быстрого затухания тока и потока в ней напряжение первичной цепи может достигнуть значительной, опасной для целости изоляции величины.

1.4. Переходные процессы в цепях постоянного тока

Рассмотрим простейший случай включения цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L на постоянное напряжение.

При включении электрической цепи (рис. 1.2, *а*) по ней пойдет ток i. С появлением тока появится ЭДС самоиндукции E, направленная против тока, задерживающая его нарастание. В произвольный момент времени t ток i будет определяться алгебраической суммой приложенного к цепи напряжения U и возникающей в ней самой ЭДС самоиндукции, равной $E=-L\dfrac{di}{dt}$, так что

$$i=\frac{U-E}{R}=\frac{U-L\dfrac{di}{dt}}{R}. \tag{1.14}$$

Отсюда скорость нарастания тока в цепи

$$\frac{di}{dt}=\frac{U-iR}{L}. \tag{1.15}$$

Чем меньше сопротивление цепи R при постоянном значении L, тем больше di/dt, но даже при $R=0$ скорость нарастания тока остается конечной, принимая максимальное значение

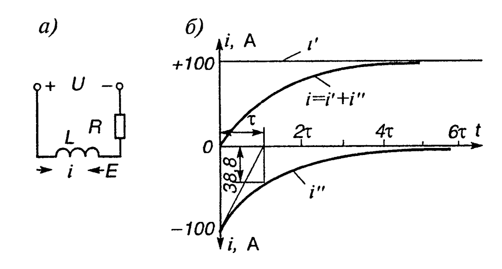


Рис. 1.2. Электрическая цепь с активным сопротивлением R и индуктивностью L (*а*) и токи при включении ее на постоянное напряжение (*б*)

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}=\frac{U}{L}. \qquad (1.16)$$

Это означает, что при включении цепи ток в ней не устанавливается мгновенно, а постепенно нарастает от нуля до установившегося значения.

При $R\neq 0$ скорость нарастания тока будет уменьшаться по мере того, как ток будет нарастать, но в начальный момент, когда $t=0$, она имеет уже найденное максимальное значение.

Для построения кривой нарастания тока в цепи необходимо решить дифференциальное уравнение (1.15). В результате решения получим

$$i=i'+i''=\frac{U}{R}-\frac{U}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}, \qquad (1.17)$$

здесь $\tau=L/R$ — постоянная времени электрической цепи; $\mathrm{e}=2{,}718$ — основание натуральных логарифмов.

Первый член уравнения (1.17) $U/R=i$ представляет собой вынужденный (установившийся) ток; второй член — $(U/R)\mathrm{e}^{-t/\tau}=i''$ — переходная апериодическая составляющая (свободный ток).

Постоянная времени τ, имеющая размерность времени, характеризует интенсивность протекания переходного процесса и представляет собой такой промежуток времени, в течение которого свободная составляющая тока i'' уменьшается в e раз, т. е. примерно до 0,37 от начального значения, принятого за единицу.

Пример. Электрическая цепь (рис. 1.2, *а*) с параметрами $R=1{,}0$ Ом; $L=20$ мГн включается на постоянное напряжение $U=100$ В. Необходимо определить ток переходного режима и его вынужденную и свободную составляющую и построить их графики.

Вынужденный ток $i'=U/R=100/|1{,}0=100$ А.

Свободный (апериодический) ток $i''=-\frac{U}{R}\mathrm{e}^{-t/\tau}=-\frac{100}{1{,}0}\mathrm{e}^{-t/\tau}$.

Постоянная времени $\tau=\frac{L}{R}=\frac{20\cdot 10^{-3}}{1{,}0}=0{,}02$ с.

Ток переходного режима $i=i'+i''=100-100\mathrm{e}^{-t/0{,}02}$.

Для построения графика изменения тока в цепи при переходном режиме задаемся значениями времени t, например, кратными постоянной времени τ. Результаты

расчетов сведены в табл. 1.1, и по ним построены графики изменения токов i', i'' и i, представленные на рис. 1.2, *б*.

Как видно из приведенного примера, переходный процесс затухает практически через $(5 \div 6)\tau$.

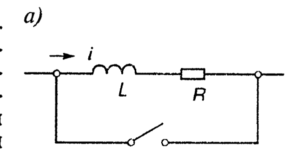
Касательная, проведенная к графику свободного тока i'' с точки $t=0$, отсекает на оси времени отрезок,равный τ.

Таблица 1.1

t	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	6τ
i'', А	100	36,8	13,3	5,0	1,8	0,63	0,25
$i=i'+i''$, А	0	63,2	86,7	95,0	98,2	99,37	99,75

Предел, к которому стремится нарастающий ток переходного режима $i=i'+i''$, представляет собой значение, определяемое законом Ома для установившегося режима цепи, т. е. $i=i'=U/R=100$ А.

Если обладающий сопротивлением и индуктивностью участок электрической цепи (рис. 1.3, *а*) с током I замыкается накоротко, то ток в этом участке исчезает не мгновенно, так как возникающая при его угасании ЭДС самоиндукции $E=-Ldi/dt$ поддерживает ток в прямом направлении.



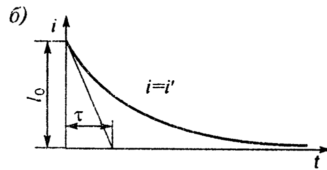


Рис. 1.3. Участок электрической цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L (*а*) и ток в цепи при его закорачивании (*б*)

По закону Ома в этом случае

$$i=E/R=-\frac{L\,di}{R\,dt}. \qquad (1.18)$$

Решая это уравнение, найдем

$$i=i''=I\,e^{-t/\tau}, \qquad (1.19)$$

где $\tau=L/R$ — постоянная времени цепи.

График изменения тока $i=f(t)$, соответствующий уравнению (1.19), представлен на рис. 1.3, *б*.

1.5. Переходные процессы в цепях переменного тока

При включении цепи с последовательно включенными активным сопротивлением R и индуктивным ωL на переменное синусоидальное напряжение в ней появится ток.

Мгновенное значение этого тока:

$$i=\frac{U+E}{R}=\frac{U-L\frac{di}{dt}}{R}. \qquad (1.20)$$

При постоянной индуктивности ($L=\text{const}$) ток i будет также изменяться по синусоидальному закону. Положив $i=I_m\cdot\sin\omega t$, т. е. приняв за начало отсчета времени тот момент, когда ток проходит через нуль и, подставляя выражение тока и производную $\frac{di}{dt}=$ $=\omega I_m\cdot\cos\omega t=\omega I_m\sin(\omega t+90°)$ в уравнение (1.20), приведем его предварительно к виду $U=iR+L\frac{di}{dt}$, получим

$$U=I_mR\sin\omega t+I_m\omega L\sin(\omega t+90°). \qquad (1.21)$$

Первый член этого уравнения представляет собой синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой I_mR, совпадающую по фазе с током, а второе слагаемое — синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m\omega L$, опережающую ток на 90°.

С другой стороны, при подаче в цепь с R и L синусоидального напряжения, независимо от того, каким было его мгновенное значение, ток в ней в момент включения должен быть равен нулю. Отсчет времени будем вести от момента включения. В произвольный момент времени t напряжение U и ток i в цепи будут связаны соотношением

$$U=iR+L\frac{di}{dt}.$$

При установившемся режиме тому же значению напряжения U соответствует иное значение тока i', связанное с напряжением U соотношением

$$U=i'R+L\frac{di'}{dt}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$0=(i-i')R+L\frac{d(i-i')}{dt}.$$

Разность неустановившегося (i) и установившегося (i') токов $i-i'=i''$ называется свободным током

$$i''R+L\frac{di''}{dt}=0.$$

Решая это дифференциальное уравнение, получим

$$i'' = N e^{-t/\tau},$$

где $\tau = L/R$.

При $t=0$ ток $i=0$, а свободный ток $i''=N$. Так как $i=i'+i''$, то

$$i'_0 + N = 0,$$

где i'_0 — установившийся ток при $t=0$. Следовательно, $N = -i'_0$.

Таким образом, в начальный момент процесса свободный апериодический ток по абсолютной величине равен установившемуся, но имеет обратное направление. Поэтому если включение произошло при таком значении напряжения, когда установившийся ток должен проходить через нуль, свободный ток вообще будет отсутствовать. Ток достигает своего наибольшего значения, если цепь будет включена в момент, когда установившийся ток должен проходить через максимум I'_m. В этом случае

$$N = -I'_m \text{ и } i'' = -I'_m e^{-t/\tau}.$$

Соответствующие этому случаю при $\omega L = R$ и $\varphi = 45°$ кривые токов и напряжения приведены на рис. 1.4.

Наибольшего значения неустановившийся ток i_m достигает примерно через полпериода после включения, когда вынужденный ток вновь достигает амплитудного значения, но имеет одинаковое направление со свободным апериодическим током i''. Следовательно,

$$i = i' + i''; \tag{1.22}$$

$$i' = I_m \sin(\omega t + \theta - \varphi); \tag{1.23}$$

$$i'' = -I_m \sin(\theta - \varphi) e^{-t/\tau}. \tag{1.24}$$

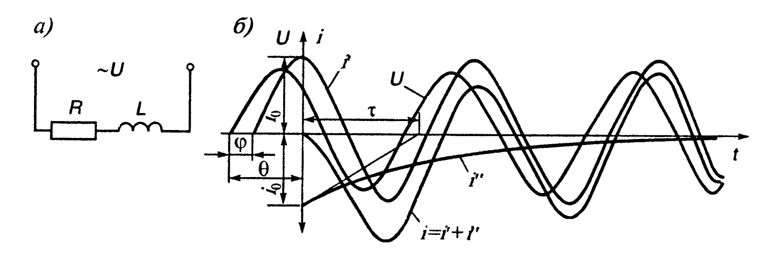


Рис. 1.4. Включение электрической цепи с активным сопротивлением и индуктивностью на синусоидальное напряжение:

а — схема цепи, *б* — графики напряжения и составляющих тока в цепи

Здесь $I_m = \frac{U_m}{Z}$; $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $\varphi = \mathrm{arctg}\frac{\omega L}{R}$; $\tau = \frac{L}{R}$; θ — начальная фаза напряжения при включении цепи; φ — угол сдвига по фазе напряжения и тока в цепи.

Пример. Электрическая цепь с параметрами $R = 1{,}0$ Ом, $L = 20$ мГ включается на синусоидальное напряжение $U_m = 100$ В, $f = 50$ Гц в тот момент, когда вынужденная составляющая тока i' должна проходить через максимум. Требуется определить токи переходного режима и построить их графики. Амплитудное значение установившегося тока

$$I_m = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{100}{\sqrt{1{,}0^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}02)^2}} = 15{,}7 \text{ А}.$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{1{,}0} = 0{,}02 \text{ с}; \ \varphi = \mathrm{arctg}\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{1{,}0} = 81°.$$

Если включение проходит в момент времени, когда вынужденный ток i', отстающий от напряжения на угол $\varphi = 81°$, должен проходить через максимум, т. е. при фазе напряжения $\theta = \varphi + 90° = 171°$, то начальные значения вынужденной и свободной составляющих тока будут равны по величине, но противоположны по знаку.

Вынужденный ток

$$i' = \frac{U_m}{Z}\sin(\omega t + \theta - \varphi) = 15{,}7\sin(\omega t + 171° - 81°) = 15{,}7\sin(\omega t + 90°).$$

Свободный ток

$$i'' = -\frac{U_m}{Z}\sin(\theta - \varphi)\,e^{-t/\tau} = -15{,}7\sin(171 - 81)\,e^{-t/\tau} = -15{,}7\,e^{-t/\tau}.$$

Результирующий ток переходного режима

$$i = i' + i'' = 15{,}7\sin(\omega t - 90°) - 15{,}7\,e^{-t/\tau}.$$

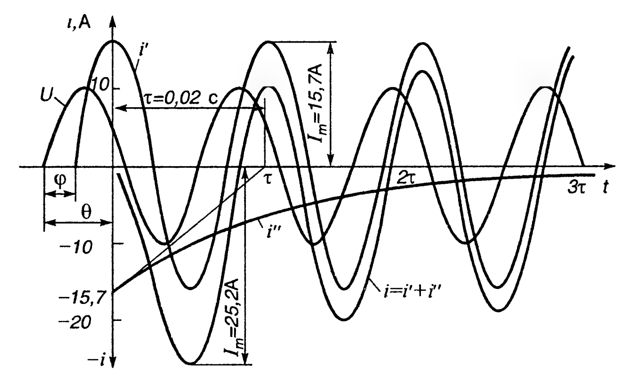


Рис. 1.5. Графики напряжения и токов в электрической цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L при включении на синусоидальное напряжение

В данном примере i' это вынужденная составляющая тока переходного режима, синусоидально изменяющаяся во времени, в установившемся режиме, а i'' — свободная составляющая тока переходного режима, апериодически изменяющаяся во времени. Графики изменения этих токов представлены на рис. 1.5.

Ток переходного режима достигнет максимального значения при $\theta = 171°$ и $t = 0{,}01$

$$i_m = I_m + I_m\,\mathrm{e}^{-t/\tau} = 15{,}7 + 15{,}7\,\mathrm{e}^{-0{,}01/0{,}02} = 25{,}2\ \text{А}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Назовите причины возникновения переходных процессов в электрических цепях.
2. Какие факторы влияют на характер переходных процессов?
3. Что понимают под коэффициентами самоиндукции и взаимоиндукции?
4. Что такое потокосцепление?
5. В чем заключается принцип постоянства потокосцепления?
6. Какова роль активного сопротивления электрической цепи в переходном процессе?
7. Какова физическая сущность постоянной времени электрической цепи?
8. Как влияет индуктивность на переходный процесс?
9. Почему ЭДС, индуктируемая в контуре, пронизываемом изменяющимся магнитным потоком, отстает от этого потока на 90°?
10. Как влияет насыщение магнитной цепи на индуктивность?
11. Почему ток в электрической цепи с индуктивностью изменяется не скачкообразно, а с некоторой конечной скоростью?
12. От чего зависит длительность переходного процесса?
13. Из каких составляющих складывается ток переходного режима в цепи с R и L, включаемой на постоянное напряжение?
14. Что понимают под фазой включения электрической цепи под напряжение?
15. Из каких составляющих складывается ток переходного режима в цепи с R и L, включаемой на синусоидальное напряжение?
16. Как влияет фаза включения электрической цепи с активным сопротивлением и индуктивностью на характер переходного процесса?
17. Для чего используют систему относительных единиц при анализе переходных процессов в ЭМ?
18. Какие основные факторы оказывают влияние на характер переходных процессов в ЭМ и как их учитывает при решении конкретных задач?
19. В чем заключаются смысл и особенности метода преобразования координат при анализе переходных процессов во вращающихся магнитосвязанных контурах?

Глава 2

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРАНСФОРМАТОРАХ

2.1. Включение трансформатора на постоянное напряжение

Переход от одного установившегося состояния трансформатора к другому совершается за очень короткое время, но может сопровождаться весьма опасными процессами, которые проявляются

в виде сверхтоков и перенапряжений. Сверхтоки возникают при коротких замыканиях, возможны при включении трансформатора в сеть и в ряде других коммутационных режимов. Возникновение перенапряжений возможно под действием атмосферных грозовых разрядов, а также в результате коммутационных процессов в цепях трансформатора.

В ряде случаев, в частности в тиристорных устройствах, используются трансформаторы, питаемые постоянным напряжением. В этом случае первичная обмотка трансформатора представляет собой электрическую цепь с активным сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1, связанную со вторичной обмоткой, обладающей параметрами R_2 и L_2 взаимной индуктивностью M.

Если вторичная обмотка разомкнута, то переходный процесс при включении первичной обмотки будет протекать аналогично тому, как показано в § 1.3.

При замкнутой вторичной обмотке процесс значительно усложняется. Токи в первичной и вторичной обмотках i_1 и i_2 будут связаны уравнениями Кирхгофа:

$$i_1R_1+L_1\frac{di_1}{dt}+M\frac{di_2}{dt}=U; \tag{2.1}$$

$$i_2R_2+L_2\frac{di_2}{dt}+M\frac{di_1}{dt}=0. \tag{2.2}$$

Решая систему уравнений относительно токов i_1 и i_2 и выводя постоянные времени каждой обмотки $\tau_1=L_1/R_1$; $\tau_2=L_2/R_2$ и коэффициент связи обмоток $K=\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$, получим

$$i_1=\frac{U}{R_1}\left(1+P_2\frac{1+P_1\tau_2}{P_1+P_2}e^{P_1t}-P_1\frac{1+P_2\tau_2}{P_1-P_2}e^{P_2t}\right); \tag{2.3}$$

$$i_2=\frac{K^2U}{(P_2-P_1)(1-K^2)M}(e^{P_1t}-e^{P_2t}). \tag{2.4}$$

Здесь P_1 и P_2 — корни соответствующего характеристического уравнения. Отсюда видно, что свободные токи в обмотках состоят из двух составляющих, затухающих с различными коэффициентами затухания $\beta_1=-P_1$ и $\beta_2=-P_2$.

Если обе обмотки имеют одинаковые параметры, т. е. $R_1=R_2=R$ и $L_1=L_2=L$, то результирующие уравнения токов существенно упрощаются и могут быть приведены к виду

$$i_1=\frac{U}{2R}\left(2-e^{-Rt/(L+M)}-e^{-Rt/(L-M)}\right)=i_1'+i_{1A}''+i_{1B}'';\qquad(2.5)$$

$$i_2=\frac{U}{2R}\left(-e^{-Rt/(L+M)}+e^{-Rt/(L-M)}\right)=i_{2A}''+i_{2B}''.\qquad(2.6)$$

Отсюда более наглядно видно, что одна из свободных составляющих токов затухает медленно, так как имеет большую постоянную времени, определяемую суммой $L+M$, а другая составляющая, определяемая разностью $L-M$, затухает быстро.

Графики токов первичной обмотки имеют вид, подобный рис. 2.1, *а*, а графики токов вторичной обмотки представлены на рис. 2.1, *б*; здесь i_{2A}'' — медленно затухающая составляющая, i_{2B}'' — быстро затухающая составляющая, i_2 — результирующий ток переходного режима.

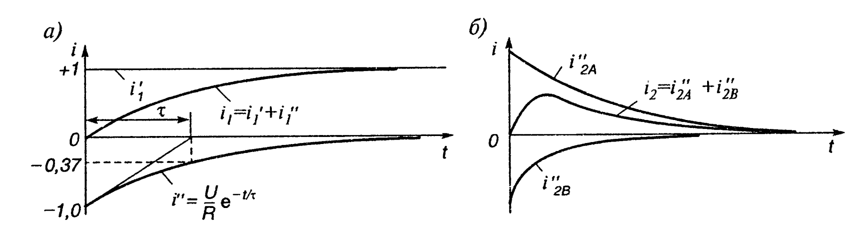


Рис. 2.1. Токи первичной обмотки трансформатора (*а*) и токи вторичной обмотки трансформатора (*б*) при включении на постоянное напряжение

2.2. Включение трансформатора на синусоидальное напряжение

Пусть к первичной обмотке однофазного трансформатора приложено напряжение

$$U_i=U_{1m}\sin(\omega t+\theta),\qquad(2.7)$$

где θ — фаза напряжения в момент включения.

Если вторичная обмотка разомкнута и сердечник не насыщен ($\mu=\infty$, $L=\text{const}$), то трансформатор можно представить как цепь с R_1 и L_1, и возникающий при включении переходный процесс можно описать уравнением

$$U_{1m}\sin(\omega t+\theta)=R_1 i_1+L_1(di_1/dt).\qquad(2.8)$$

Результирующий ток в цепи при этом будет так же, как и в случае включения на постоянное напряжение, определяться двумя составляющими

$$i_1 = i_1' + i_1''. \quad (2.9)$$

Причем вынужденный (установившийся) ток, обусловленный действием приложенного напряжения U_1

$$i_1' = I_{1m} \sin(\omega t + \theta - \varphi_0), \quad (2.10)$$

где

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_{11}^2}}; \ \varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{\omega_1 L_{11}}{R_1}. \quad (2.11)$$

Вторая составляющая

$$i_1'' = -I_{1m} \sin(\theta - \varphi_0) \mathrm{e}^{-t/\tau_1} \quad (2.12)$$

представляет собой свободный ток апериодического характера, не поддерживаемый внешним напряжением и поэтому затухающий с постоянной времени $\tau_1 = L_1/R_1$. При этом ток i_1' удовлетворяет уравнению (2.8), а ток i_1'' — уравнению

$$0 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}. \quad (2.13)$$

Следовательно, при $t=0$, $i_1 = i_1' + i_1'' = 0$, т. е. начальное значение свободного тока всегда равно по величине и обратно по знаку начальному значению вынужденного (установившегося) тока.

Если включение происходит при такой начальной фазе напряжения θ, что $\theta - \varphi = 0$, то свободный ток $i_1'' = 0$ и в цепи сразу возникает установившийся режим. Если же $\theta - \varphi = \pm\pi/2$, то i_1'' достигает максимально возможной величины, равной при $t=0$ амплитуде установившегося переменного тока I_{1m}. При этом максимальное мгновенное значение тока в цепи наступает примерно через полпериода после включения и может достигнуть $i_{1m} \approx 2I_{1m}$ (рис. 2.2).

Следует также отметить, что поскольку активное сопротивление обмоток трансформатора значительно меньше индуктивного ($R_k \ll X_k$), то при к.з. $\varphi \approx 90°$. Очевидно, что графики токов переходного режима, соответствующие уравнениям (2.9), (2.10) и (2.12), подобны тем, которые представлены на рис. 1.5 для случая включения цепи с активным сопротивлением и индуктивностью на переменное напряжение. В реальных трансформаторах необходимо считаться с заметным насыщением магнитной цепи, при котором $L_2 \neq \mathrm{const}$, так как

$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_{11}}, \ \frac{d(L_{11} i_1)}{dt} = w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

то вместо уравнения (2.8) можно записать

$$\frac{U_{1m}}{w_1}\sin(\omega t+\theta)= \\ =\frac{R_1}{L_1}\Phi+\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (2.14)$$

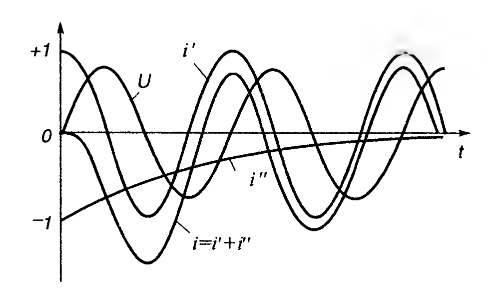


Рис. 2.2. Токи первичной обмотки трансформатора при включении на синусоидальное напряжение

Решая уравнение (2.14) относительно магнитного потока Φ и пренебрегая первым членом из-за его малости и полагая $L_{11}=\text{const}$, получим

$$\Phi=\Phi'+\Phi''. \qquad (2.15)$$

Здесь Φ' — мгновенное значение вынужденной составляющей магнитного потока; Φ'' — мгновенное значение свободной составляющей потока, причем

$$\Phi'=\Phi_m\sin\left(\omega t+\theta-\frac{\pi}{2}\right)=\Phi_m\cos(\omega t+\theta); \qquad (2.16)$$

$$\Phi_m=\frac{L_{11}U_{1m}}{w_1\sqrt{R_1^2+W^2L_2^2}}; \qquad (2.17)$$

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{\omega L_{11}}{R_1}\approx\frac{\pi}{2}; \qquad (2.18)$$

$$\Phi''=(\Phi_m\cos\theta\pm\Phi_{\text{ост}})\,e^{-t/\tau_{11}}. \qquad (2.19)$$

Наиболее благоприятным будет случай включения, когда $\theta=\pm\pi/2$ (напряжение при этом проходит через максимум), а ток будет отставать от напряжения ~ на 90° и остаточный поток $\Phi_{\text{ост}}=0$. В этом случае в цепи сразу же появится ток установившегося режима.

Наиболее «тяжелым» переходный процесс будет, если включение происходит при $\theta=0$, при этом

$$\Phi=-\Phi_m\cos\omega t+(\Phi_m+\Phi_{\text{ост}})\,e^{-t/\tau}. \qquad (2.20)$$

Графики магнитных потоков, соответствующих уравнениям (2.15), (2.16), (2.19) и (2.20), представлены на рис. 2.3.

Так как в переходном режиме магнитный поток, с учетом остаточной намагниченности, может возрастать более чем в два раза, то

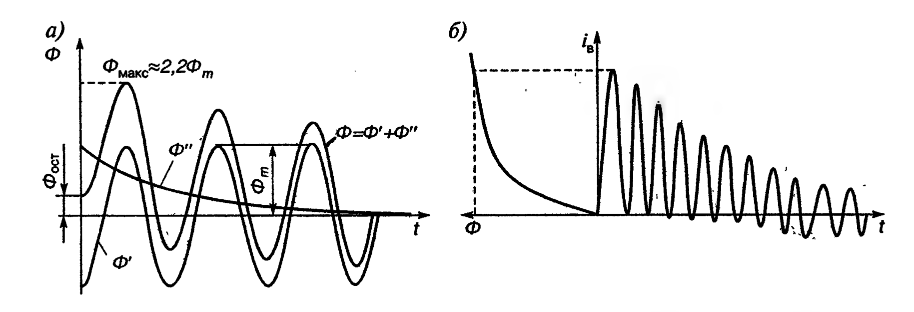


Рис. 2.3. Графики изменения магнитного потока (*а*) и тока (*б*) при включении трансформатора с насыщающейся магнитной системой

сердечник сильно насыщается и это приводит к возникновению намагничивающих токов, до 100 — 120 раз превышающих установившийся ток х.х.

2.3. Внезапное короткое замыкание трансформатора

Если пренебречь намагничивающим током х.х., то при внезапном к.з. трансформатор представляет собой реактивную катушку с общим сопротивлением $R_к = R_1 + R_2'$ и общим индуктивным сопротивлением $X_к = X_1 + X_2' = \omega L_{\sigma 1} + \omega L_{\sigma 2}' = \omega L_к$ (рис. 2.4, *а*), где $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ — индуктивности потоков рассеяния трансформатора, практически не зависящие от насыщения, т. е. $L_к \approx \text{const}$. Уравнение напряжений этой цепи

$$U_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \theta_к) = \\ = i_{1к} R_к + L_к \frac{di_к}{dt}, \tag{2.21}$$

где $\theta_к$ — фаза напряжения при возникновении к.з.

Решая это уравнение относительно тока, получим

$$i_к = i_к' + i_к''. \tag{2.22}$$

При этом установившийся ток

$$i_к' = I_{1кm} \sin(\omega t + \theta - \varphi_к); \tag{2.23}$$

$$I_{1кm} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_к^2 + X_к^2}}; \tag{2.24}$$

$$\varphi_к = \operatorname{arctg} \frac{X_к}{R_к} \approx 90°, \text{ так как } X_к \gg R_к. \tag{2.25}$$

Свободный ток

$$i''_к = i'_{к0}\,e^{-t/\tau} = I_{1кm}\sin(\theta_к - \varphi)\,e^{-t/\tau}, \qquad (2.26)$$

где $\tau = \dfrac{L_к}{R_к}$.

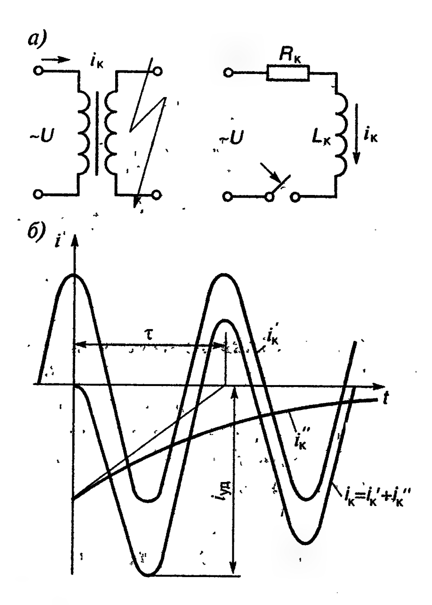


Рис. 2.4. Электрическая схема (*а*) и токи (*б*) трансформатора при внезапном к.з.

Термическое действие тока к.з. Как видно из (2.26), свободная составляющая тока к.з. изменяется во времени по закону $e^{-t/\tau}$ и в реальных трансформаторах уже через $t \simeq (3 \div 4)\tau \simeq$ $\simeq 0{,}02 \div 0{,}15$ с практически исчезает. Это значит, что в малых трансформаторах переходный процесс практически заканчивается за один период, а у больших — через 6÷7 периодов при $f_1 = 50$ Гц.

Несмотря на столь малую продолжительность, переходный процесс при к.з. представляет серьезную опасность прежде всего в связи с возникновением значительных ударных токов из-за их теплового и механического действия.

Максимальное (ударное) значение тока к.з. наблюдается примерно через $t = \pi/2$ (рис. 2.4, *б*), и оно равно

$$i_{уд} = I_{кm} K_{уд}, \qquad (2.27)$$

где $K_{уд}$ — ударный коэффициент

$$K_{уд} = 1 + e^{-(\pi R_к)/X_к} = 1 \div 2. \qquad (2.28)$$

Под действием тока к.з. температура обмоток может достигнуть величины, опасной для целости изоляции.

Термическое действие тока к.з. обычно характеризуется временем, в течение которого температура обмоток трансформатора при к.з. достигает 250 °С.

Это время (с) определяется уравнением

$$t_т \approx 2{,}5\,(U_к / J_{ср})^2, \qquad (2.29)$$

где $U_к$ — напряжение к.з. трансформатора; $J_{ср}$ — средняя плотность тока в обмотках трансформатора в номинальном режиме.

Принято считать допустимым прирост температуры обмоток 4 — 5 градусов в секунду. Обычно $t_т \simeq 5 \div 25$ с.

Механическое действие тока к.з. Наряду с возрастанием токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора, пропорционально им возрастает напряженность и индукция магнитного поля рассеяния. Электромагнитные силы, действующие на отдельные проводники обмотки, определяются произведением индукции (Тл) поля рассеяния на ток проводника (А)

$$F = B \cdot i \cdot 10^{-2} \text{ Н/см.}$$

Между проводниками, по которым ток протекает в противоположных направлениях, как это практически имеет место при к.з. трансформатора, возникают механические силы $F_1 = -F_2$ (рис. 2.5). Обе эти силы можно разложить на радиальные составляющие F_{x1} и F_{x2} и осевые F_{y1} и F_{y2}. Первые стремятся растянуть наружную обмотку и сжать внутреннюю, а вторые — сместить обмотки в осевом направлении. Так как при к.з. $i_1 = i_2' = i_к$, то силы F_1 и F_2 пропорциональны $i_к^2$, следовательно, носят периодический, переменный характер.

Кроме усилий F_x и F_y между витками одной и той же обмотки действуют усилия F_i, которые стремятся сжать обмотку по высоте. Эти усилия имеют место и при нормальной работе трансформатора, но тогда они невелики и не представляют опасности.

При расчете механических усилий обычно исходят из электромагнитной энергии обмоток, соответствующей потоку рассеяния. При к.з. произведение Bi возрастает пропорционально i^2 и в тот момент, когда ток достигает своего наибольшего значения $i_{кm}$, сила F возрастает в $K_{уд}^2$ раз до величины, способной разрушить обмотку. По этой причине конструкцию обмотки выполняют таким образом, чтобы ее витки и катушки в целом были прочно укреплены и способны выдерживать большие механические силы.

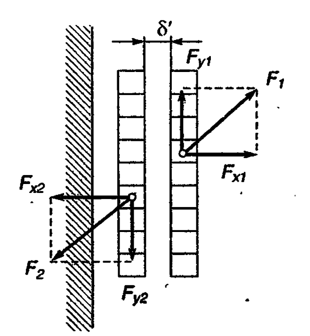


Рис. 2.5. Схема взаимодействия механических сил в обмотках трансформатора

Расчет механических воздействий тока к.з. представляет значительные трудности и на практике выполняется по приближенным формулам.

Максимальное радиальное (наиболее опасное) усилие (Н), действующее на обмотки трансформатора при внезапном к.з., определяется уравнением

$$F_{xm} = 1{,}452 \cdot 10^6 K_{уд}^2 \frac{K_{ст} P_н}{f_1 U_к \delta'}, \qquad (2.30)$$

здесь $K_{уд}$ — ударный коэффициент; $K_{ст}$ — коэффициент, определяющий мощность, приходящую на один стержень трансформатора (для 3-фазного 3-стержневого трансформатора $K_{ст}=1{,}3$); $P_н$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; δ' — приведенная ширина зазора между обмотками, см; $U_к$ — напряжение к.з. трансформатора, %; f_1 — частота напряжения, Гц.

Разрывающее усилие, приходящееся на единицу площади поперечного сечения обмотки (Н/мм²)

$$F_{разр}=\frac{F_{xm}}{2\pi w_1 S_1}, \quad (2.31)$$

где w_1 — число витков первичной обмотки; S_1 — площадь поперечного сечения провода, мм².

Особенно опасными являются витковые короткие замыкания в трансформаторах. Допустим, что во вторичной обмотке, имеющей W_2 витков, замкнулось $W_{2к}$ витков, тогда из условия равновесия МДС получим

$$I_{1н}=\frac{100}{U'_к}W_1=I_{2к}W_{2к}; \text{ так как } I_{1н}W_1\approx I_{2н}W_2, \text{ то } \frac{I_{2к}}{I_{2н}}=\frac{100W_2}{U'_кW_{2к}}.$$

Следовательно, ток $I_{2к}$ в короткозамкнутых витках вторичной обмотки может в сотни раз превосходить номинальные значения тока $I_{2н}$ этой обмотки. При всех этих условиях короткозамкнутые витки могут за доли секунды нагреться до температуры плавления меди.

Кроме того, между витками возникнут большие механические силы. Между двумя параллельными проводниками будет действовать сила (Н/см)

$$F=2\frac{i_1i_2}{\alpha}\cdot 10^{-7},$$

где α — расстояние между центрами сечений проводников, см; i_1 и i_2 — мгновенные значения токов в проводниках.

Если положить $S=20$ мм², $\alpha=1$ см, плотность тока в проводниках $J_к=1000$ А/мм², то $F\simeq 80$ Н/см, т. е. усилие составит около 1 т.с. на 1 м проводника.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1) ток внезапного к.з. представляет собой сумму токов синусоидального тока установившегося режима $i'_к$, имеющего частоту сети, и свободного тока $i''_к$, имеющего в момент к.з. ту же амплитуду, что и установившийся ток $i'_к$, но представляющего собой апериодическую функцию времени;

2) в момент возникновения к.з. (при $t=0$) токи $i'_к$ и $i''_к$ равны по величине, но направлены встречно, следовательно, результирующий ток равен нулю;

3) при прочих равных условиях свободный ток $i''_к$ достигает наибольшей величины, когда к.з. происходит в момент перехода напряжения через нуль, т. е. при $\theta_к-\varphi_к=0$. Если же включение происходит в момент, когда напряжение проходит через максимум, т. е. при $\theta_к-\varphi_к=90°$, то свободный ток равен нулю.

Максимальное (ударное) значение тока $i_{уд}$ достигается приблизительно через $\omega t=\pi$, или $t=\pi/\omega$, после начала к.з.

Ударный коэффициент $K_{уд}$ показывает, во сколько раз ударный ток к.з. больше амплитуды установившегося тока к.з.

Свободный ток $i''_к$ затухает тем быстрее, чем больше отношение R_k/X_k. В трансформаторах малой мощности $R_к/X_к=1/2\div1/3$, $K_{уд}=1{,}2\div1{,}3$ и переходный процесс затухает за один-два периода. В траснформаторах большой мощности $R_к/X_к<1/10$ и $K_{уд}=1{,}75\div1{,}85$.

Пример. Трансформатор мощностью 5600 кВ·А: $U_1=35$ кВ, 50 Гц, $U_к=6{,}5\%$, $U_{ка}=1{,}5\%$, $U_{кх}=6{,}32\%$, $K_{ст}=1/3$, $S_1=20{,}7$ мм^2, $w_1=571$ виток, $\delta'=6{,}15$ см. Требуется определить ударный ток к.з. и его термическое и динамическое действие.

Принимая во внимание, что $\dfrac{R_к}{X_к}=\dfrac{U_{ка}}{U_{кх}}$, ударный коэффициент равен (2.28)

$$K_{уд}=1+e^{-(\pi R_к)/X_к}=1+e^{-(\pi U_{ка})/U_{кх}}=1+e^{-(\pi\cdot1{,}5)/6{,}32}=1{,}475.$$

Ударный ток

$$i_{уд}=\frac{100}{U_к\%}K_{уд}=\frac{100}{6{,}5}\cdot1{,}475=22{,}7.$$

Следовательно, в данном случае при внезапном к.з. ударный ток будет в 22,7 раза больше номинального.

Для оценки термической устойчивости трансформатора при к.з. определим номинальный ток трансформатора

$$I_{1н}=\frac{P_1}{U_1}=\frac{5600}{35\cdot\sqrt{3}}=92{,}5\text{ А}.$$

Плотность тока в обмотке в номинальном режиме

$$J_{1ср}=\frac{I_{1н}}{S_1}=\frac{92{,}5}{20{,}7}=4{,}5\text{ А/мм}^2.$$

Время $t_т$, в течение которого температура обмоток при к.з. достигнет 250 °С, определим по (2.29):

$$t_т\approx2{,}5\left(\frac{U_к}{J_{ср}}\right)^2=2{,}5\left(\frac{6{,}5}{4{,}5}\right)^2=5{,}2\text{ с}.$$

Механическое действие тока к.з. определяем по (2.30):

$$F_{xm}=1{,}452\cdot10^6\cdot K_{уд}^2\frac{K_{ст}P_н}{f_1U_к\delta'}=1{,}452\cdot10^6\cdot1{,}475^2\frac{1\cdot5600}{3\cdot50\cdot6{,}5\cdot6{,}15}=2{,}95\cdot10^6\text{ Н}.$$

Разрывающее усилие, приходящееся на единицу площади поперечного сечения провода обмотки

$$F_{раз}=\frac{F_{xm}}{2\pi w_1S_1}=\frac{2{,}95\cdot10^6}{2\pi\cdot571\cdot20{,}7}=39{,}5\text{ Н/мм}^2.$$

Для медной обмотки допустимо $F_{раз.доп}=60$ Н/мм^2.

2.4. Перенапряжения в трансформаторах

При нормальных условиях работы трансформатора между отдельными частями его обмоток, а также между обмотками и заземленным корпусом действуют синусоидальные напряжения номинальной величины и частоты.

В процессе эксплуатации возможно появление перенапряжений аварийного, коммутационного и грозового характера в виде кратковременных электрических импульсов, периодических или апериодических волн. При этом вследствие наличия в системе индуктивностей и емкостей возможно возникновение электромагнитных колебаний различных частот.

Начальный участок волны называется фронтом, его длительность обычно исчисляется микросекундами. Фронт волны можно рассматривать как первую половину полуволны некоторого периодического напряжения, имеющего частоту $f=10\div50$ кГц.

В реальном трансформаторе, кроме распределенной индуктивности L и активного сопротивления R обмотки, имеются емкости между витками и катушками, а также между обмотками и корпусом. При рабочей частоте 50 Гц емкостное сопротивление $1/\omega C$ трансформатора очень велико и его влиянием можно пренебречь. Однако при высоких частотах их роль резко возрастает. Ток, созданный зарядом волны перенапряжения, сначала проходит не по виткам, а по емкостной цепи. При этом напряжение волны на зажимах трансформатора падает до нуля, а затем волна отражается и возрастает до 2-кратной величины. Напряжение распределяется между витками неравномерно, так как заряды волны не могут проникнуть через индуктивные элементы. В первый момент воздействия волны с крутым фронтом между начальными элементами обмотки могут возникнуть опасные для ее изоляции напряжения. В связи с этим крайние катушки трансформаторов выполняют с усиленной изоляцией.

В высоковольтных трансформаторах (при $U_1\geqslant110$ кВ) применяют специальные емкостные экраны, обеспечивающие выравнивание напряжения вдоль обмотки в переходных режимах.

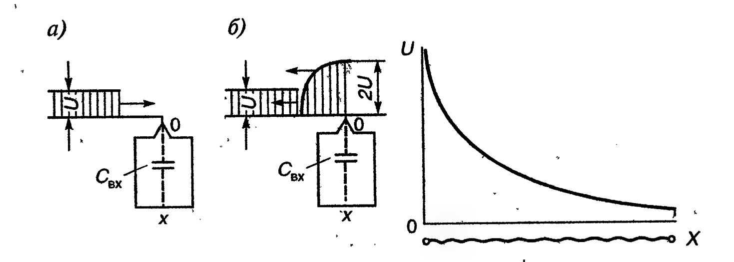


Рис. 2.6. Схема продвижения волны перенапряжения (*а*) и ее распределение между витками обмотки трансформатора (*б*)

На рис. 2.6 показана схема продвижения волны перенапряжения и ее распределения между витками вдоль обмотки «0 — X» трансформатора.

Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют особенности переходных процессов при включении трансформатора на постоянное напряжение при разомкнутой и замкнутой цепи вторичной обмотки?
2. Чем определяется всплеск тока вторичной цепи и скорость его нарастания и спадания при включении первичной обмотки на постоянное напряжение?
3. Почему и как влияет уровень насыщения магнитной цепи трансформатора на ток переходного режима при включении на синусоидальное напряжение?
4. При каких условиях и почему при внезапном к.з. трансформатора в его обмотке возникает апериодическая составляющая тока к.з.?
5. Какое влияние оказывает активное сопротивление и индуктивное сопротивление электрической цепи на характер переходного процесса?
6. От чего зависит величина ударного тока к.з.?
7. Как оценивают термическое действие тока к.з.?
8. Как оценивают механическое действие тока к.з. и какие составляющие усилий при этом являются наиболее опасными?
9. Чем опасны витковые замыкания трансформатора?
10. Чем определяется длительность переходных процессов в трансформаторах?
11. При каких условиях возникают перенапряжения в трансформаторах?
12. Для каких частей обмотки трансформатора перенапряжения представляют наибольшую опасность и почему?

Глава 3

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

3.1. Характеристика переходных процессов

Переходные процессы в асинхронных двигателях (АД) представляют собой сочетание электромагнитных переходных процессов, вызванных коммутационными операциями, и механических пере-

ходных процессов, обусловленных быстрыми изменениями частоты вращения машин.

Скорость затухания электромагнитных переходных процессов зависит в основном от параметров обмоток, а механических — от моментов инерции вращающихся масс и величины нагрузки.

Постоянные времени электромагнитных переходных процессов в некоторых случаях значительно меньше постоянных времени затухания механических процессов, тогда они оказывают малое влияние друг на друга и расчет механических процессов производят по статическим пусковым характеристикам. Но часто они оказываются соизмеримыми, и в этом случае рассматриваются электромеханические переходные процессы с учетом взаимного влияния электромагнитных и механических параметров АД. В результате влияния свободных токов электромагнитный момент вращения АД может быть как больше, так и меньше момента, определяемого статической механической характеристикой. Быстрое изменение частоты вращения сказывается на величине токов в обмотках и, следовательно, на величине вращающего момента. Следовательно, при анализе переходных процессов в АД необходимо учитывать как изменение энергии магнитных полей, так и изменение кинетической энергии вращающихся частей привода.

Процесс пуска АД начинается с подачи напряжения на обмотку статора. В обмотках возникают не только гармонические токи и потокосцепления, соответствующие приложенному напряжению, но и свободные составляющие. При некотором упрощении можно считать, что в процессе пуска один из свободных потоков все время неподвижен относительно статора, а другой вращается вместе с ротором. Вынужденный поток вращается с синхронной частотой. При этом потокосцепление ротора, обусловленное вращающимся свободным потоком, сложным образом затухает во времени. Электромагнитный момент определяется взаимодействием всех потоков.

Основными характеристиками переходных процессов в АД, которые представляют наибольший интерес, являются величины токов и моментов, время протекания, потери энергии в обмотках и их нагрев.

3.2. Включение обмотки статора при разомкнутой обмотке ротора

При исследовании и анализе переходных процессов пуска АД различают два предельных случая — включение обмотки статора на синусоидальное напряжение $(U = U_m \sin \omega t)$ при разомкнутой и при короткозамкнутой обмотке ротора.

При включении АД с разомкнутой фазной обмоткой ротора переходный процесс носит качественно такой же характер, как и при включении трансформатора на х.х.

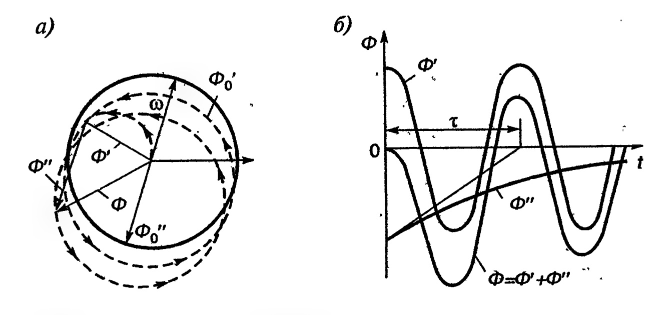


Рис. 3.1. Магнитные потоки асинхронного двигателя при его включении с разомкнутой обмоткой ротора:

а — пространственная схема, *б* — временная схема

В общем случае результирующий магнитный поток

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \tag{3.1}$$

где $\Phi' = \Phi_m \cos \omega t$ — вынужденная составляющая магнитного потока, вращающегося с частотой $n = f_1/p$; $\Phi'' = \Phi_0'' e^{-t/\tau_1}$ — свободная апериодическая составляющая магнитного потока, неподвижная в пространстве (здесь $\tau_1 = L_1/R_1$ — постоянная времени обмотки статора). При $t = 0$ свободная составляющая магнитного потока Φ_0'' равна вынужденной составляющей Φ_0', но имеет противоположное направление так, что результирующий магнитный поток Φ равен нулю. Далее, с течением времени, конец вектора результирующего магнитного потока Φ будет перемещаться по кривой, постепенно приближаясь к окружности (см. рис. 3.1).

Примерно через полпериода после включения АД свободный Φ'' и вынужденный Φ' магнитные потоки совпадут по направлению и результирующий магнитный поток Φ достигнет максимального значения. Стальной магнитопровод АД при этом будет сильно насыщаться, обусловливая появление значительных, до $(3 \div 4)I_н$ намагничивающих токов.

Остаточная индукция и насыщение стали при включении АД играют ту же роль, что и в трансформаторе, только наличие воздушного зазора ослабляет их влияние.

3.3. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора

Асинхронный двигатель с замкнутой обмоткой ротора представляет собой систему двух магнитосвязанных контуров, один из которых возбуждается напряжением сети. Переходный процесс при этом описывается уравнениями:

для статора

$$U_1=\frac{d\psi_1}{dt}+i_1R_1; \tag{3.2}$$

для ротора

$$0=\frac{d\psi_2}{dt}+i_2R_2, \tag{3.3}$$

где ψ_1 и ψ_2 — потокосцепления обмоток соответственно статора и ротора.

Анализ процессов осложняется насыщением магнитной цепи, а также тем, что взаимоиндукция между обмотками фаз статора и ротора не постоянна, а изменяется по закону:

$$M_{A\alpha}=M\cos\alpha, \tag{3.4}$$

где α — угол между осями фаз статора A и ротора α.

Для упрощения анализа обычно вводят допущения:

а) магнитную цепь АД считают линейной, т. е. пренебрегают насыщением магнитной цепи и изменением параметров машины, связанным с вытеснением тока в проводниках обмотки ротора при пуске;

б) принимают $R_1=R_2'$ и $X_1=X_2'$.

Весь процесс разгона АД при пуске разделяют на три этапа (рис. 3.2):

1. На обмотку статора подают напряжение, ротор неподвижен, в обмотках появляются вынужденные и свободные токи.

2. Ротор приходит во вращение и разгоняется до критического скольжения.

3. Ротор разгоняется от критического скольжения до установившейся частоты вращения.

Этап I. При анализе первого этапа пуска статор и ротор АД можно рассматривать как аналог трансформатора. В этом случае, как обычно, для двух магнитосвязанных контуров можно считать, что ток в каждом из них состоит из токов вынужденного i' и свободного i'' режимов, т. е. $i=i'+i''$.

В данном случае под током вынужденного режима понимают ток, устанавливающийся в обмотках неподвижного двигателя после окончания электромагнитных переходных процессов, даваемый в каталогах под названием пускового тока.

Для определения тока вынужденного режима i' используют обычную схему замещения АД (рис. 3.3)

$$i'=I_m\cos(\omega t+\theta_k-\varphi_k). \tag{3.5}$$

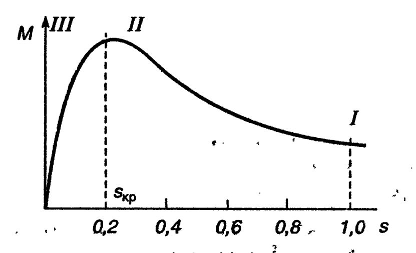


Рис. 3.2. Характерные этапы процесса пуска асинхронного двигателя

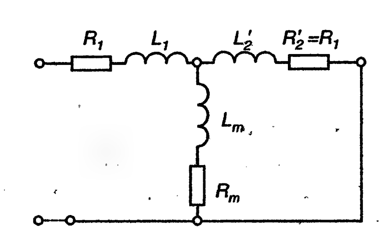


Рис. 3.3. Схема замещения асинхронного двигателя для определения тока вынужденного режима

Для определения свободного тока i'' полагаем, что схема замещения замкнута накоротко (рис. 3.4) через питающую сеть с малым сопротивлением, которое можно принять равным нулю. Тогда

$$i''=I_m\cos(\theta_k-\varphi_k)e^{-t/\tau}=i_0'e^{-t/\tau}. \qquad (3.6)$$

Свободные токи поддерживаются за счет ЭДС, возникающих вследствие изменения потокосцепления индуктивностей. Таких индуктивностей в схеме две — индуктивность рассеяния, состоящая из индуктивностей первичной L_1 и вторичной L_2 обмоток ($L_\sigma=L_1+L_2$), и индуктивность контура намагничивания L_m. Следовательно, при включении АД появятся два апериодических тока с двумя различными постоянными времени.

Для определения токов, возникающих при изменении потокосцепления контура намагничивания L_m (токов вида «А»), схему замещения можно упростить (рис. 3.5, *а*), если пренебречь параметром R_m из-за его малости по сравнению с X_m, а также сопротивлением рассеяния, так как $L_\sigma \ll L_m$.

Апериодический ток, вызванный изменением потокосцепления намагничивающего контура, очевидно, будет затухать с постоянной времени

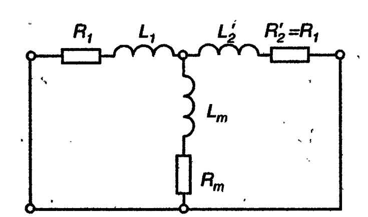


Рис. 3.4. Схема замещения асинхронного двигателя для определения свободного тока

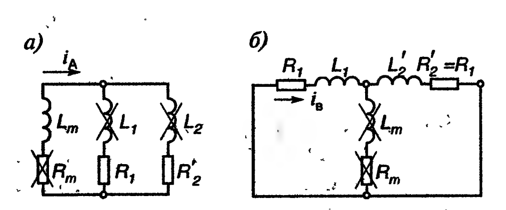


Рис. 3.5. Схемы замещения асинхронного двигателя для определения свободных токов: *а* — вида «А» и *б* — вида «В»

$$\tau_A \simeq \frac{2L_m}{R_1} = \frac{2X_m}{R_1\omega_1}. \quad (3.7)$$

Для определения токов, возникающих вследствие изменения потокосцепления контуров рассеяния (токов вида «В»), схема замещения может быть упрощена, если пренебречь цепью намагничивания (L_m и R_m) вследствие ее значительного сопротивления по сравнению с цепью основного тока (рис. 3.5, *б*). Постоянная времени этой цепи

$$\tau_B = \frac{L_1}{R_1} = \frac{X_1}{R_1\omega_1}. \quad (3.8)$$

В замкнутой обмотке ротора будут протекать:

а) ток вынужденного режима, создаваемый вращающимся полем вынужденного тока статора;

б) токи, обусловленные полями свободных токов вида «А» и «В» статора. Так как поля этих токов неподвижны в пространстве (и неподвижен ротор), а изменяется только их величина, то индуктируемые ими токи в обмотке ротора будут также апериодическими, затухающими с теми же постоянными времени.

Уравнения равновесия ЭДС и напряжений в этом случае будут иметь вид:

для статора

$$L\frac{di_1}{dt} + L_m\frac{di_2}{dt} + i_1R_1 = U; \quad (3.9)$$

для ротора

$$L\frac{di_2}{dt} + L_m\frac{di_1}{dt} + i_2R_2 = 0. \quad (3.10)$$

Здесь $L = L_\sigma + L_m$ — полная индуктивность обмотки. Из этих уравнений могут быть найдены значения токов i_1, i_2 и $i_0 = i_1 + i_2$, причем

$$i_1 = i_1' + i_A'' + i_B'', \quad (3.11)$$

$$i_2 = i_2' + i_A'' + i_B''. \quad (3.12)$$

Величина апериодического тока будет зависеть не только от параметров схемы замещения АД, но и от фазы включения.

Начальное значение составляющей тока вида «А» очень невелико, и поэтому влиянием ее можно пренебречь. Тогда ток статора определится уравнением

$$i_1 = I_{1m}\cos(\omega t + \theta - \varphi_k) - I_{1m}\cos(\theta - \varphi_k)\,e^{-t/\tau_B}, \quad (3.13)$$

здесь θ — фаза включения, $\varphi_к$ — угол между векторами напряжения и тока, соответствующий режиму установившегося к.з.; I_{1m} — амплитуда тока, определяемого по схеме замещения АД при скольжении $S=1$ или взятого из каталога.

Наиболее неблагоприятным, очевидно, будет случай включения АД при $\theta=\varphi_к$, тогда ток статора достигает максимального значения. По истечении времени $t=\pi/\omega$ он будет равен

$$i_{1m}=-I_{1m}(1+e^{-\pi/(\omega_1\tau_B)}). \tag{3.14}$$

График токов представлен на рис. 3.6.

Вращающий момент при включении АД с заторможенным ротором определяется суммой следующих составляющих (рис. 3.7):

1. M_1 — от взаимодействия установившихся токов статора и ротора, без учета переходных составляющих (дается в каталогах)

$$M_1 \approx m_1 R_2' U_1^2/[\Omega_1 R_к^2 + X_к^2)]. \tag{3.15}$$

2. M_2 — от взаимодействия апериодических составляющих токов статора и ротора, затухающий с постоянной времени τ_2, причем

$$\frac{1}{\tau_2}=\frac{1}{\tau_A}+\frac{1}{\tau_B}. \tag{3.16}$$

При $t=0$ этот момент по величине равен пусковому моменту установившегося режима (M_1). Так как $\tau_A \gg \tau_B$, то можно считать $\tau_2 \approx \tau_B$. Тогда

$$M_2=M_1 e^{-t/\tau_B}. \tag{3.17}$$

3. M_3 — от взаимодействия установившегося тока и апериодических токов вида «А», пульсирующий с частотой сети и затухающий с постоянной времени τ_A

$$M_3=-\frac{M_1}{\cos\varphi_к}\times$$
$$\times\cos(\omega_1 t-\varphi_к)e^{-t/\tau_A}. \tag{3.18}$$

Рис. 3.6. Составляющие тока обмотки статора при пуске асинхронного двигателя

4. M_4 — от взаимодействия установившегося тока и токов вида

«В», пульсирующий так же, как и M_3, с частотой сети и затухающий с постоянной времени τ_B.

$$M_4 = -\frac{M_1}{\cos\varphi_к}\cos(\omega_1 t + \varphi_к)e^{-t/\tau_B}. \tag{3.19}$$

Таким образом, вращающий момент АД при неподвижном роторе в переходном режиме равен

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 =$$

$$= M_1\left[1 + e^{-t/\tau_B} - \frac{\cos(\omega_1 t - \varphi_к)e^{-t/\tau_A} + \cos(\omega_1 t - \varphi_к)e^{-t/\tau_B}}{\cos\varphi_к}\right]. \tag{3.20}$$

Приближенно максимальное значение вращающего момента при включении АД с заторможенным ротором можно определить по формуле:

$$M_m = M_1\left(1 + \frac{1}{\cos\varphi_к}\right). \tag{3.21}$$

Параметры АД (активные и индуктивные сопротивления) изменяются в течение переходного периода из-за изменения насыщения стали и вытеснения тока в стержнях ротора. В частности, при пуске АД основной магнитный поток уменьшается по сравнению с номинальным режимом из-за значительного падения напряжения в обмотке статора, обусловленного пусковым током. При этом сталь магнитопровода будет не насыщенной, следовательно, X_m при пуске будет больше, чем в рабочем режиме, а X_k зубцовой зоны — наоборот, меньше.

Этап II. Когда ротор приходит во вращение, переходные процессы значительно усложняются. Поля апериодических токов видов «А» и «В» статора неподвижны в пространстве и, следовательно, они наводят в обмотках вращающегося ротора затухающие переменные токи с частотой $f_1(1-s)$. Поля апериодических токов видов «А» и «В» ротора вращаются вместе с ротором и наводят в обмотках статора затухающие переменные токи с частотой $f_1(1-s)$. Эти токи

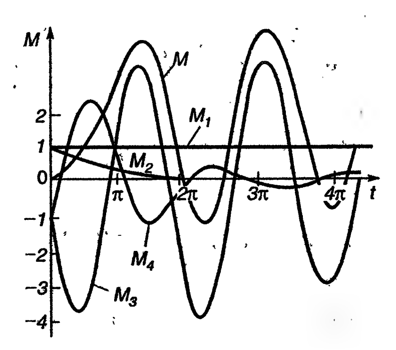


Рис. 3.7. Составляющие вращающего момента асинхронного двигателя при пуске с заторможенным ротором

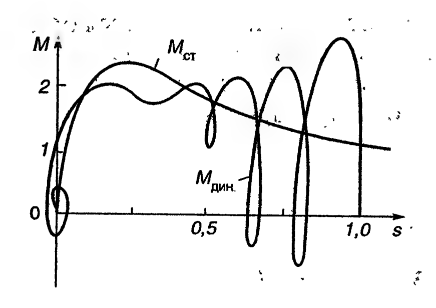


Рис. 3.8. Вращающий момент асинхронного двигателя в процессе пуска

замыкаются через сеть, питающую обмотку статора.

Исследование переходных процессов в АД при его разгоне базируется на совместном рассмотрении электромагнитных и механических условий равновесия.

Условие механического равновесия:

$$J\frac{d\Omega}{dt}=M-M_{ст}, \tag{3.22}$$

где J — момент инерции системы, приведенной к валу АД; Ω — угловая частота вращения ротора; $M_{ст}$ — момент сопротивления привода.

Вращающий момент на валу АД представляют суммой моментов, возникающих в результате взаимодействия отдельных составляющих токов, как и в случае неподвижного ротора.

Поля, образованные свободными токами, могут как усиливать, так и ослаблять поле, создаваемое вынужденными токами. Поэтому, наряду с пиками, могут иметь место и провалы в кривой результирующего вращающего момента АД.

Этап III. После достижения критического скольжения дальнейший разгон АД происходит при значительном угловом ускорении ротора. С уменьшением скольжения уменьшается ток статора. Однако под влиянием индуктивности обмотки снижение величины тока отстает от уменьшения скольжения и тем резче, чем меньше момент инерции ротора, а также связанных с ним приводных устройств и чем больше индуктивность обмотки.

При этом возможно такое положение, при котором частота вращения ротора будет равна синхронной, но токи в обмотках статора и ротора не будут равны нулю и, следовательно, будет создаваться некоторый вращающий момент, который вызовет увеличение частоты вращения ротора выше синхронной. После этого возникнут тормозные моменты, и частота вращения ротора АД будет, затухая, колебаться около синхронной (рис. 3.8).

3.4. Процесс разбега АД

При пуске АД с короткозамкнутой обмоткой ротора время его разбега зависит от величины тормозного момента на валу $M_{ст}$, инерционного момента вращающихся масс $M_{и}$ и механической характеристики $M=f(s)$.

Для характеристики инерционного момента электрических машин обычно пользуются инерционной постоянной H (с), которая

представляет собой время, в течение которого ротор ускоряется под действием номинального вращающего момента от неподвижного состояния до синхронной частоты вращения, при том условии, что момент использовался только для разгона вращающихся масс:

$$H=2{,}74\frac{GD^2}{P_н}\left(\frac{n_1}{1000}\right)^2, \quad (3.23)$$

где GD^2 выражено в кг·м², $P_н$ — в кВт, n_1 — в об/мин.

Для машин мощностью 1 кВт $H=0{,}1\div0{,}2$ с, а 100 кВт — $H=0{,}5\div1$ с. Большие величины относятся к двухполюсным машинам.

Если пуск АД осуществляется на холостом ходу ($M_{ст}=0$), при $M=M_m=\mathrm{const}$ из неподвижного состояния ($\Omega=0$) до синхронной частоты вращения (Ω_c), при инерционном моменте

$$M_и=J\frac{d\Omega}{dt}=J\frac{d(2\pi n)}{dt}, \quad (3.24)$$

то время разбега будет равно

$$t=\int\limits_0^{\Omega_c}\frac{J}{M_и}d\Omega=\frac{J\Omega_0}{M_m}=T_m. \quad (3.25)$$

Величина T_m носит название постоянной времени пуска АД в ход, выражаемая в секундах, если момент инерции вращающихся частей ротора $J=GD^2/4\cdot9{,}81$ Н·м² при GD^2, выраженном в кг/м², Ω — рад/с.

Если пренебречь добавочными и механическими потерями и соответствующим им моментом M_0 и принять

$$\frac{M}{M_m}\simeq\frac{2}{\frac{s_к}{s}+\frac{s}{s_к}}, \text{ а } M_m\simeq M_{нач}\left(1+\frac{1}{2s_к}\right),$$

то время разбега двигателя (с) от $s=1{,}0$ до заданного значения s будет равно

$$t_п=\frac{T_м}{2}\left(\frac{1-s^2}{2s_к}+s_k\ln\frac{1}{s}\right). \quad (3.26)$$

Если принять $R_1=R_2'$, то

$$\frac{M}{M_m}=2(1+s_k)\bigg/\left(\frac{s}{s_k}+\frac{s_k}{s}+2s_k\right). \qquad (3.27)$$

По каталожным данным $M_н$, $K_м$ и $s_н$ можно определить s_k, а затем относительную величину момента для любого скольжения s.

При малых скольжениях в области номинальных нагрузок можно принять

$$\frac{M}{M_m}\approx\frac{2(1+s_k)s}{s_k}. \qquad (3.28)$$

Скольжение, соответствующее максимальному моменту,

$$s_k=\frac{R_2}{X_1+X_2'}. \qquad (3.29)$$

Здесь $R_2=R_2'\sigma_1^2$, $\sigma_1=1+X_1/X_m$ из Г-образной схемы замещения.

В начале переходного процесса при пуске электромагнитный момент АД может превышать номинальный в $2\div4$ раза, вызывая удары в передаточных механизмах. Частота вращения повышается быстро, а при $s\to0$ приближается асимптотически к установившемуся значению. На продолжительность пуска АД электромагнитные переходные процессы практически не оказывают влияния, так как наличие положительных пиков вращающего момента компенсируется отрицательными пиками, и в результате время разгона незначительно отклоняется от времени, определяемого по статической характеристике.

3.5. Тепловые потери в обмотках АД при пуске

При разбеге АД ток заметно превышает номинальный, поэтому в его обмотках выделяется значительное количество тепловой энергии. Если пренебречь током холостого хода и принять $I_1=I_2'$, то потери энергии в обмотках за время пуска составят

$$A=\int_0^t m_1 I_2'^2(R_1+R_2')\,dt. \qquad (3.30)$$

Здесь I_2', R_1 и R_2' — ток и сопротивления Т-образной схемы замещения АД.

Решая это уравнение, найдем, что за время пуска от $s=1$ до $s=0$ потери энергии в АД составляют

$$A_1 = m_1 I_x^2 R_x T_x / 4 s_k, \quad (3.31)$$

где I_x — ток в главной цепи АД (без учета тока намагничивания по Г-образной схеме замещения); s_k — критическое скольжение; T_x — постоянная времени пуска АД.

Принимая во внимание, что $M = M_m = \mathrm{const}$, время разбега АД

$$t = \frac{J}{M_m} \Omega_c = T_м, \quad (3.32)$$

потери, выделяемые во время пуска в обмотке ротора АД, равны

$$A_2 = 0{,}5 J \Omega_c^2, \quad (3.33)$$

где J — момент инерции ротора (с приводным механизмом); Ω_c — синхронная частота вращения.

Следовательно, количество тепловой энергии, выделяемой при пуске АД в обмотке ротора, равно кинетической энергии самого ротора и соединенных с ним вращающихся масс.

3.6. Повторное включение АД

Часто случается, что напряжение, подводимое к зажимам обмотки статора АД, изменяется в результате переключений, так, например, при срабатывании автоматического повторного включения в системе электроснабжения, при переключениях со звезды на треугольник, при переключении числа пар полюсов и т. д. Переключение, как правило, производится таким образом, что сначала АД отключается от сети, а затем вновь включается.

В выключенном состоянии АД не развивает вращающего момента и тормозится под влиянием нагрузки и потерь. Замедление вращения ротора зависит от момента инерции вращающихся масс.

При отключении АД магнитный поток спадает по экспоненциальному закону и наводит в обмотках ЭДС, величина которой зависит от частоты вращения ротора. При частоте вращения ротора, близкой к синхронной, величина ЭДС E оказывается близкой к амплитуде напряжения сети (рис. 3.9, *а*).

При повторном (после кратковременного перерыва) включении напряжение в обмотке фазы будет равно:

$$U + E = -2 U_m \sin(\omega t + \theta + K_1) \sin\frac{\Delta\omega\Delta t}{2}. \quad (3.34)$$

Здесь Δt — длительность перерыва питания АД; $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, т. е. напряжение фазы будет иметь биения, обусловленные тем, что

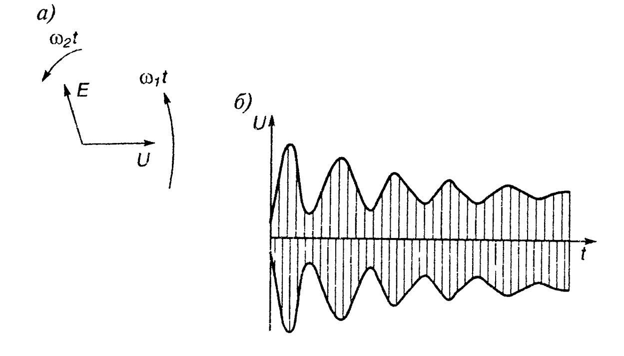


Рис. 3.9. Изменение напряжения на обмотках асинхронного двигателя при повторном включении после кратковременного отключения:

а — векторная диаграмма; *б* — диаграмма напряжения

частота ЭДС ω_2 от затухающего поля близка к частоте ω_1 напряжения сети. Максимум огибаемой кривой равен двойной амплитуде фазного напряжения сети (рис. 3.9, *б*). Напряжения $U+E$ по фазам симметричны, поскольку $M_{эм}$ и n АД не зависят от фазы включения, а определяются промежутком времени между отключением АД и повторным включением, а также интенсивностью снижения частоты вращения n после отключения от сети. Предельная величина $U+E$ равна двойной амплитуде $U_ф$, а максимальное значение переходного вращающего момента $M_{мах.незатух}=4M_{мах.затух}$.

3.7. Реверсирование асинхронного двигателя

Процесс реверсирования состоит из двух этапов: на первом — двигатель отключается от сети; на втором — на двигатель подается напряжение с обратным порядком следования фаз по сравнению с исходным.

Предположим, что до переключения ротор АД вращался с синхронной частотой в прямом направлении. Вектор, образованный из трех фазных напряжений, будет $U_1 e^{-j\omega t}$, ток холостого хода протекает лишь в обмотке статора. Потокосцепление статора $\psi_1=U_1/\omega_1$, потокосцепление ротора $\psi_r=K_1\psi_1=K_1U_1/\omega_1$. После отключения обмотки статора потокосцепление ротора остается неизменным $\psi_{r0}=$ $=K_1U_c/\omega_1$, а потокосцепление статора, вследствие того, что теперь оба потокосцепления создаются токами в роторе, становится равным $K_rK_1U_c/\omega_1=(1-\sigma)U_1/\omega_1$. Потоки вращаются вместе с ротором с синхронной частотой в прежнем направлении.

Так как постоянная времени холостого хода имеет величину порядка секунды, можно пренебречь затуханием потока в выключенном состоянии, длящемся в течение нескольких периодов.

При последующем включении АД с обратным порядком следования фаз вектор напряжения, образованный из напряжений всех

трех фаз, будет вращаться с синхронной угловой частотой в обратном направлении и $U_1 = U e^{-j\omega_1 t}$.

В установившемся режиме этому напряжению соответствует потокосцепление статора $\psi_1 = U_1 e^{j\omega_1 t}/j\omega_1$. Конец вектора ψ_1 будет описывать окружность. Если в момент включения ($t=0$) потокосцепление статора ψ_{10} образует угол α с вектором U_1, то $\psi_{10} = U_1 e^{j\alpha}/j\omega_1$, тогда, пренебрегая активными сопротивлениями, при $t \geqslant 0$

$$\psi_1 = \frac{UK_1}{\omega_1}[(1-\sigma)e^{j\alpha} + j - j e^{-j\omega_1 t}]. \tag{3.35}$$

Ток в обмотке статора будет:

$$i_1 = \frac{\psi_1 - K_r \psi_r}{L_1'}. \tag{3.36}$$

Вектор тока i_1 достигает максимума при $\alpha = \pi/2$ и $\omega_1 t = \pi$

$$i_{1m} = \frac{U_1}{X_1} \cdot 2(2 - \sigma_1). \tag{3.37}$$

Здесь L_1' — результирующая приведенная к статору индуктивность эквивалентной Т-образной схемы неподвижного АД без активных сопротивлений и с короткозамкнутым ротором; $\sigma_1 = 1 + X_1/X_m \simeq \simeq 1{,}04 \div 1{,}08$.

Если реактивность $X_1 = 0{,}2$, то максимальная величина тока равна примерно 20-кратной амплитуде номинального тока. При таких условиях включения ток достигнет этой величины через полпериода. В течение этого времени вследствие затухания ток уменьшится примерно до 0,65 (для АД мощностью $10 \div 20$ кВт) и в действительности будет $i_{1m} \simeq 13 I_н$.

Вращающий момент, возникающий при реверсировании, может быть найден по потокосцеплениям. Пренебрегая активным сопротивлением статора и учитывая

$$\frac{K_r}{K_1} = \frac{L_1}{L_r} = \frac{X_1}{X_r},$$

опрокидывающий момент

$$M_k = \frac{1}{\omega_1} \frac{3}{2} K_r K_1 \frac{U_1^2}{2X_1},$$

а

$$M = 2M_k[(1-\sigma)\sin\omega_1 t + \cos(\omega_1 t - \theta) - \cos(2\omega t - \theta)]$$

и для $\theta = 45°$, $\omega_1 t = 90°$ и $\sigma = 0{,}08$

$$M = 2M_k(0{,}92 + 0{,}707 + 0{,}707) = 4{,}7M_k.$$

Таким образом, через $\pi/2$ вращающий момент достигнет величины, превышающей опрокидывающий момент в 4,7 раза, или при $M_k = 2{,}2M_н$ превысит номинальный момент примерно в 10 раз.

При реверсировании АД скольжение изменяется от $s \simeq 2$ до $s \simeq 0$, т. е. процесс начинается с режима тормоза. Суммарное напряжение на фазах статора при реверсе с незатухающим магнитным полем складывается из положительного напряжения сети и ЭДС, создаваемой затухающим магнитным полем $U_1 + E$.

Огибающая фазных напряжений имеет вид биений, как и при повторном включении, однако они сдвинуты друг относительно друга на 120 эл.град. Вследствие этого на характер переходного процесса будет оказывать влияние фаза включения, предшествующий режим работы АД и характеристики отключающей аппаратуры.

Очевидно, наиболее благоприятным будет включение реверса при $\theta = \pm\pi/2$. При $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ будут иметь место наиболее тяжелые режимы.

Потери энергии в обмотке статора при реверсе

$$A_1 = m_1 I_к^2 R_к \frac{T_м}{s_k}, \tag{3.38}$$

где $I_к$ — ток фазы АД; s_k — критическое скольжение; $T_м$ — постоянная времени пуска, т. е. при реверсировании в АД выделяется в 4 раза больше тепла, чем при пуске из неподвижного состояния.

3.8. Отключение АД от сети

При отключении АД от сети возникают переходные процессы, обусловленные исчезновением энергии магнитного поля. Количество энергии определяется в основном величиной воздушного зазора. Чем больше зазор, тем больше запас энергии. При отключении АД эта энергия рассеивается, проявляясь в форме электрической дуги в размыкаемых контактах и перенапряжений в обмотке статора.

Скорость исчезновения магнитного потока определяется постоянными цепи ротора. Токи, проходящие в обмотке ротора после отключения АД от сети, являются затухающими, апериодическими. Создаваемая ими МДС по отношению к обмотке ротора неподвижна. МДС ротора создает магнитное поле, вращающееся в пространстве вместе с ротором, угловая частота вращения которого после отключения АД от сети под влиянием момента сопротивления апериодически уменьшается от ω_2 до нуля. Это магнитное поле создает в обмотке статора ЭДС, равную при нормаль-

ной работе АД $EK_1 \simeq \omega_1 d\Phi/dt$, а в первый момент после отключения АД от сети $E_1' \simeq \omega_1 d\Phi/dt$.

Отношение значений этих ЭДС

$$\frac{E_1'}{E_1}=\left(1+j\frac{\tau_2}{\omega_1}\right)e^{-t/\tau}. \qquad (3.39)$$

Модуль отношения (3.39) для $t=0$

$$\left(\frac{E_1'}{E_1}\right)_{t=0}=\sqrt{1+\left(\frac{R_2}{\omega_1 L_{22}}\right)^2}. \qquad (3.40)$$

Из этого выражения видно, что при внезапном отключении АД от сети в обмотке статора может возникать значительное повышение напряжения в том случае, когда активное сопротивление цепи ротора R_2 относительно велико. Опыт показывает, что при отключении АД с разомкнутой обмоткой ротора перенапряжения могут достигать $3 \div 4$-кратной величины к $U_н$. В этой связи отключение АД следует производить при к.з. в обмотке ротора.

Пример. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие данные. Мощность 110 кВт; $2p=4$; $f_1=50$ Гц; $R_1=0{,}01$ о.е.; $R_2'=0{,}015$ о.е.; $X_1=0{,}1$ о.е.; $X_2'=0{,}12$ о.е.; $X_m=4{,}5$ о.е.; $\cos\varphi_н=0{,}9$ о.е.; $s_н=0{,}035$; $M_m/M_н=2{,}2$; $M_п/M_н=1{,}1$; $R'_{2(1)}/R_2'=2{,}0$; $GD^2=205$ Н·м²; коэффициент насыщения для основного потока $K_н=1{,}35$; то же для потока рассеяния $K_{н\sigma}=1{,}22$.

Определить максимальный бросок тока и минимальный момент при пуске (ротор неподвижный); рассчитать время разбега при прямом пуске АД на холостом ходу из неподвижного состояния ($s=1$) и построить график $s=f(t)$.

При пуске АД, когда ротор неподвижен, его можно рассматривать как трансформатор, для которого максимальное значение тока определяется по формуле (2.24)

$$i_{пик}=I_п\sqrt{2}\left(1+e^{-(R_к\pi)/X_к}\right).$$

Пусковой ток определяется по известной формуле

$$I_п=\frac{U}{\sqrt{R_к^2+X_к^2}}=\frac{1}{\sqrt{0{,}025^2+0{,}22^2}}=4{,}5 \text{ о.е.};$$

$$R_к=R_1+R_2'=0{,}01+0{,}015=0{,}025 \text{ о.е.};$$

$$X_к=X_1+X_2'=0{,}1+0{,}12=0{,}22 \text{ о.е};$$

$$i_{пик}=4{,}5\sqrt{2}\,(1+e^{-0{,}025\pi/0{,}22})=10{,}8 \text{ о.е.}$$

Время разбега при прямом пуске АД из неподвижного состояния согласно (3.36)

$$t_п=\frac{T_м}{2}\left(\frac{1-s^2}{2s_k}+s_k\ln\frac{1}{s}\right).$$

Здесь электромеханическая постоянная

$$T_м = \frac{J\omega}{M_m} = \frac{5{,}22 \cdot 157}{1593} = 0{,}515 \text{ с.}$$

Угловая частота вращения

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с.}$$

Момент инерции ротора

$$J = \frac{GD^2}{4g} = \frac{205}{4 \cdot 9{,}81} = 5{,}22 \text{ Н} \cdot \text{м}^2.$$

Критическое скольжение

$$s_k = \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} = \frac{0{,}015}{0{,}1 + 0{,}12} = 0{,}068.$$

Номинальный момент

$$M_н = \frac{P}{2\pi f_1/p} = \frac{110 \cdot 10^3}{2\pi 50/2} \cdot 2{,}273 = 1593 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент

$$M_m = \frac{U_1^2}{2X_к} = \frac{1}{2 \cdot 0{,}22} = 2{,}273 \text{ о. е.,}$$

тогда время разбега

$$t_п = \frac{T_м}{2}\left(\frac{1-s^2}{2 \cdot s_k} + s_k \ln\frac{1}{s}\right) = \frac{0{,}515}{2}\left(\frac{1-s^2}{0{,}176} + 0{,}068 \ln\frac{1}{s}\right).$$

Для вычисления времени разбега $t_п$ для разных значений скольжения s (по (3.26)) составляем программу (для МК61).

Программа вычислений

адрес	команда	код	примечания
00	X→ПО	40	запись в регистр 0 заданного значения
01	F1/X	23	
02	F ln	18	
03	П→XB	6L	вычисление $s_k \ln\frac{1}{s}$
04	X	12	
05	1	01	
06	П→XO	60	
07	FX^2	22	
08	−	11	
09	2	02	вычисление $\frac{1-s}{2s_k}$
10	÷	13	
11	П→XB	6	
12	÷	13	

13 14 15 16 17	+ П→ХА X 2 ÷	10 6– 12 02 13	вычисление $t_п$
18	С/П	50	индикация $t_п$
19 20	БП 00	51 00	переход к счету с новым значением s

Ввод программы: В/О $F_{пр1}$ программа $F_{авт}$ В/О.

Ввод данных $T_м$ Х→$П_а$; s_k х→$П_в$; s_0→ПО.

Работа: задаем значение s=1,00; 0,95 и т. д. s/П — индикация.

Приводим для примера решение этой же задачи с использованием персональной ЭВМ.

```
LPRINT Процесс разбега ротора АД при х.х.
P=30000
r2p=.029
X1=.09
X2p=.14
Xm=4
Tm=1.24
ni=1500
GD2=39
g=9.81
Omega=25
Sk=r2p/(X1+X2p)
Mm=P/ni
J=GD2/(4*g)
Tm=J*Omega/Mm
S=1
LPRINT "Результаты расчетов"
LPRINT " ┌────────┬────────┐"
LPRINT " │   S    │   tп   │"
LPRINT " ├────────┼────────┤"
WHILE S>0
  tp=Tm/2*((1-S^2)/(2*Sk)+Sk*LOG (l/S))
  LPRINT USING "|   #.##"; S;
  LPRINT USING" #.###|"; tp
  IF S>=.05 THEN S=S-.05 ELSE S=
S-.01
WEND
LPRINT "|____|____|"
END
```

Результаты расчетов

s	$t_п$
1.00	0.000
0.95	0.244
0.90	0.476
0.85	0.696
0.80	0.904
0,75	1.100
0.70	1.284
0.65	1.456
0.60	1.617
0.55	1.765
0.50	1.902
0.45	2.027
0.40	2.141
0.35	2.244
0.30	2.336
0.25	2.418
0.20	2.491
0.15	2.556
0.10	2.619
0.05	2.692
0.04	2.711
0.03	2.736
0.02	2.769
0.01	2.824

По результатам расчета строим график $s=f(t)$ (рис. 3.10).

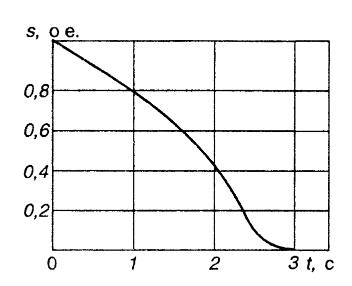


Рис. 3.10. Процесс разбега АД

Вопросы для самопроверки

1. Какова природа переходных процессов в АД?
2. Что такое параметры АД и как они зависят от режима работы?
3. Физический смысл электромагнитной и электромеханической постоянных времени АД.
4. Какие упрощающие допущения обычно вводят при анализе пусковых процессов?
5. Особенности переходных процессов при включении обмотки статора АД при разомкнутой обмотке ротора.
6. Какие составляющие токов обычно рассматривают при пуске АД с короткозамкнутой обмоткой ротора?
7. Чем обусловлено появление быстро и медленно изменяющихся составляющих тока статора при пуске АД?
8. Из каких составляющих складывается вращающий момент асинхронного двигателя при пуске?
9. Чем различаются статическая и динамическая механические характеристики АД?
10. Условия и причины появления сверхсинхронной частоты вращения ротора АД.
11. Как оценивают тепловые потери в обмотках АД при пуске?
12. Чем характерны переходные процессы при повторном включении АД после кратковременного отключения?
13. Какие факторы и как влияют на переходный процесс при повторном включении АД?
14. Как протекают переходные процессы в АД при реверсировании?
15. Как оценивают тепловые потери в обмотках АД при реверсировании?
16. Чем обусловлены переходные процессы в АД при отключении питающего напряжения?
17. Чем определяется величина перенапряжений в обмотках при отключении АД?

Глава 4
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

4.1. Параметры синхронных машин

Эксплуатационные и аварийные переходные процессы в синхронных машинах (СМ) весьма разнообразны. Их протекание, как и в других электромеханических системах, сопряжено с накоплением или рассеянием магнитных полей и механической энергии вращающихся частей и, следовательно, зависит от параметров машины.

Синхронные машины по конструкции магнитных систем подразделяются на явнополюсные и неявнополюсные. Условную ось, проходящую вдоль полюсов СМ, называют *продольной* (d), а ось, проходящую по середине междуполюсного пространства, называют *поперечной* (q). Синхронные машины включают в себя несколько магнитных и электрических связанных между собою контуров, параметры которых имеют разные значения по осям d и q. Связь между отдельными контурами зависит от режима работы СМ,

и поэтому они часто не остаются постоянными в течение переходного периода. Некоторые переходные процессы, например при асинхронном пуске, синхронизации, колебаниях при изменении нагрузки и т. п., связаны с изменением частоты вращения. Все эти факторы существенно осложняют аналитическое исследование переходных процессов.

При практическом решении задач, связанных с анализом переходных процессов в СМ, обычно вводят упрощающие допущения. К их числу в ряде случаев, в зависимости от поставленных задач, могут быть отнесены следующие положения:

1. Магнитная система ненасыщена и поэтому индуктивности машины остаются постоянными и не зависят от МДС.

2. В кривых распределения МДС и индукции в воздушном зазоре по расточке статора принимают только их основные, первые гармонические, а ЭДС в обмотке якоря принимается синусоидальной, соответствующей первой гармонической.

3. В магнитной системе отсутствуют потери.

4. Фазные обмотки якоря симметричны, а ротор симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.

5. Все возможные демпферные контуры по продольной оси заменяют одной эквивалентной продольной демпферной обмоткой; аналогично предполагают, что по поперечной оси также имеется только одна эквивалентная поперечная демпферная обмотка.

6. Частота вращения ротора в течение переходного процесса остается неизменной, синхронной.

Под параметрами понимают группу констант, определяющих режим работы СМ в различных условиях. К ним относятся прежде всего активные и реактивные сопротивления.

СМ в общем случае содержит несколько электрических и магнитных контуров. Для упрощения часто вводят понятия эквивалентных контуров, заменяющих собой ряд трудно разделимых контуров, которым соответствуют эквивалентные параметры. Различают параметры установившихся (симметричных и несимметричных) режимов, переходного и сверхпереходного режимов, насыщенной и ненасыщенной машины.

К параметрам обмотки якоря СМ относятся: активное сопротивление обмотки якоря R_1, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря $X_{1\sigma}$, индуктивные сопротивления соответственно продольной и поперечной реакции якоря X_{ad} и X_{aq}.

Синхронные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q:

$$X_d = X_{1\sigma} + X_{ad}; \quad X_q = X_{1\sigma} + X_{aq}. \tag{4.1}$$

Продольные и поперечные переходные индуктивные сопротивления обмотки якоря по осям d и q:

$$X'_d = X_d - X^2_{ad}/X_в;\ X'_q = X_q - X^2_{aq}/X_{1q}. \qquad (4.2)$$

Продольное и поперечное сверхпереходные индуктивные сопротивления обмотки якоря

$$X''_d = X_{1\sigma} + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{в\sigma}} + \frac{1}{X_{\sigma yd}}\right)^{-1};\ X''_q = X'_q. \qquad (4.3)$$

К параметрам обмоток полюсов СМ относятся:

индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения $X_{в\sigma}$;

индуктивное сопротивление обмотки возбуждения, обусловленное продольной реакцией якоря $X_{aвd} \approx X_{ad}$;

полное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке якоря $X_в$;

активное сопротивление обмотки возбуждения $R_в$;

индуктивные сопротивления рассеяния демпферной обмотки по продольной и поперечной осям X_{yd} и X_{yq};

полное индуктивное сопротивление демпферной обмотки по продольной и поперечной осям

$$X_{1d} = X_{yd} + X_{ad};\ X_{1q} = X_{yq} + X_{aq}. \qquad (4.4)$$

К параметрам несимметричных режимов относятся активные и индуктивные сопротивления нулевого R_0, X_0 и обратного R_2, X_2 следования фаз.

От параметров СМ зависят постоянные времени затухания свободных токов в обмотках машин при неустановившихся режимах.

Если контур электромагнитно связан с другими контурами, то под значениями R и X понимают эквивалентные величины с учетом взаимных связей.

Часто при определении индуктивных сопротивлений СМ принимают магнитную проницаемость стали $\mu_{ст} \simeq \infty$. Однако в действительности с ростом насыщения увеличивается магнитное сопротивление стальных участков и $\mu_{ст}$ уменьшается.

В реальных СМ $X_{ненасыщ} = (1{,}1 \div 1{,}2) X_{насыщ}$.

Расчет параметров СМ производят по известным методикам [4], но можно их найти и экспериментально [6, 10, 26]. В частности, значение $X_{1\sigma}$ может быть определено по методу вынутого ротора при пониженном напряжении, т. е.

$$X_{зв} = \sqrt{Z_s^2 - R_1^2} \approx \frac{U_1}{I_1}, \qquad (4.5)$$

где $Z_s = \dfrac{U_1}{I_1}$; $U_1 = (0{,}1 \div 0{,}2) U_\delta$; U_δ — базисное напряжение.

Полученное значение $X_{зв} > X_{1\sigma}$, поэтому вводят поправку

$$X_в = 15 f_1 (W_1 K_{w1}/p) l_1 \cdot 10^{-8}, \qquad (4.6)$$

здесь l_1 — полная длина сердечника якоря

$$X_\sigma = X_{sв} - X_в. \qquad (4.7)$$

Параметры X_d и X_q можно определить по методу малого скольжения.

Если ротор СМ с разомкнутой обмоткой возбуждения вращать с малым скольжением, то ток в фазе статора будет изменяться от I_{max} до I_{min}, при этом

$$\frac{U_1}{I_{min}} \simeq X_d, \ \frac{U_1}{I_{max}} \simeq X_q.$$

Параметры X''_d и X''_q можно определить статическим методом. В этом случае при замкнутой обмотке возбуждения индуктора к обмоткам двух фаз подводят пониженное напряжение 50 Гц, так, чтобы $I_1 \simeq 0{,}25 I_н$. При медленном вращении ротора осциллографируют значения тока I_1, изменяющегося от I_{min} до I_{max}, и напряжения $Z''_{max} = U_1/(2I_{min})$, $Z''_{min} = U_1/(2I_{max})$

$$X''_{max} = \sqrt{Z''^2_{max} - R^2_{max}} \approx X''_d. \qquad (4.8)$$

Аналогичным путем определяют X''_q.

4.2. Уравнения Горева — Парка

Синхронные машины в общем случае имеют электрическую и магнитную несимметрию, а их обмотки связаны индуктивно и перемещаются относительно друг друга. Поэтому при аналитическом исследовании переходные процессы могут быть описаны весьма сложными дифференциальными уравнениями.

Поскольку неявнополюсную СМ можно рассматривать как частный случай, когда $X_d = X_q$, будем рассматривать явнополюсную СМ.

На рис. 4.1 условно изображены сечения витков фазы A, витков обмотки возбуждения в продольной успокоительной d_y и поперечной успокоительной q_y; на них показано положительное направление токов, соответствующее положительному направлению МДС и потока данной обмотки, совпадающее с направлением ее оси.

Пусть статор СМ неподвижен, а индуктор вращается. Положение его будем определять углом δ (эл. град.) между осью фазы A неподвижного статора и северным полюсом индуктора (рис. 4.1)

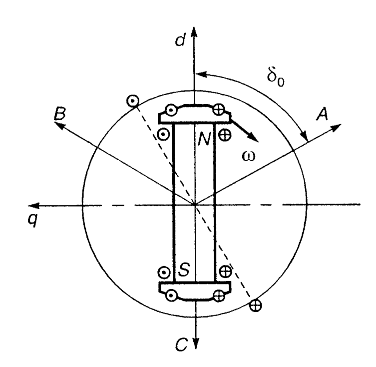


Рис. 4.1. Координатные оси синхронной машины

$$\delta = \omega t - \delta_0, \qquad (4.9)$$

здесь ω — угловая частота; t — время; δ_0 — угол между осью северного полюса индуктора и фазы A при $t=0$.

Обмотка возбуждения, расположенная на индукторе, создает МДС и магнитное поле, направленное только по оси d, а распределенная по полюсным наконечникам короткозамкнутая демпферная обмотка в установившихся режимах не обтекается током и при переходных режимах создает поле по осям d и q.

Для синхронного генератора (СГ), как магнитосвязанной системы, можно написать уравнения равновесия напряжений и соответствующих токов по фазам

$$\left.\begin{aligned} U_A &= i_A R_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B &= i_B R_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C &= i_C R_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{aligned}\right\} \qquad (4.10)$$

Здесь ψ_A, ψ_B, ψ_C — потокосцепления по фазам.

$$\left.\begin{aligned} i_A &= i_d \cos\delta - i_q \sin\delta + i_0; \\ i_B &= i_d \cos\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) - i_q \sin\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_0; \\ i_C &= i_d \cos\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) - i_q \sin\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_0. \end{aligned}\right\} \qquad (4.11)$$

В связи с неравномерностью воздушного зазора между ротором и статором магнитное сопротивление каждой фазы будет зависеть от положения ротора. Поэтому МДС и поток каждой фазы обмотки якоря и результирующую МДС всех трех фаз можно представить в виде двух составляющих, одной — действующей по продольной оси, а другой — действующей по поперечной оси. Следовательно, суммарное действие всех трех обмоток статора, создающих потоки

Φ_A, Φ_B, Φ_C, также можно разложить на продольную и поперечную составляющие, с потоками Φ_d и Φ_q.

При установившемся режиме магнитные потоки Φ_d и Φ_q неизменны во времени, в то время как потоки Φ_A, Φ_B и Φ_C меняются по синусоидальному закону. Более простыми получаются уравнения равновесия потоков, токов, напряжений. Иначе говоря, вместо того чтобы рассматривать совместное действие трех неподвижных обмоток фаз A, B, C, рассматривается действие двух воображаемых вращающихся обмоток «продольной» и «поперечной», создающих по отношению к обмоткам ротора тот же самый суммарный эффект, т. е. то же потокосцепление, что и три неподвижные фазные обмотки статора.

В этом случае уравнения равновесия напряжений и соответствующих токов для обмотки якоря могут быть преобразованы в виде составляющих U_d и U_q и примут вид:

$$\left.\begin{aligned} U_d &= i_d R_\text{a} + \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{d\delta}{dt}\psi_q; \\ U_q &= i_q R_\text{a} + \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{d\delta}{dt}\psi_d; \\ U_0 &= i_0 R_\text{a} + \frac{d\psi_0}{dt}. \end{aligned}\right\} \tag{4.12}$$

$$\left.\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3}\left[i_A\cos\delta + i_B\cos\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C\cos\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]; \\ i_q &= \frac{2}{3}\left[i_A\sin\delta + i_B\sin\left(\delta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_C\sin\left(\delta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]; \\ i_0 &= (i_A + i_B + i_C)/3. \end{aligned}\right\} \tag{4.13}$$

При этом ток i_0 будет протекать только при соединении фаз в звезду с нулевым проводом.

Эта система уравнений была впервые предложена независимо друг от друга в СССР проф. Горевым и в США — проф. Парком и поэтому обычно называется уравнениями Горева — Парка.

В этих уравнениях: $\frac{d\psi}{dt}$ — соответствующие трансформаторные противоЭДС, $\frac{d\delta}{dt}\psi$ — противоЭДС вращения; она вводится при переходе к системе отсчета d и q, вращающейся относительно неподвижного статора. При $n = \text{const}$ $\frac{d\delta}{dt} = \omega$, а $\frac{d\delta}{dt}\psi = \omega\psi$.

Аналогичные уравнения могут быть составлены для обмоток возбуждения и демпферной, т. е.

$$U_в = i_в R_в + \frac{d\psi_в}{dt}; \qquad (4.14)$$

$$0 = i_{yd} R_{yd} + \frac{d\psi_{yd}}{dt};\ 0 = i_{yq} R_{yq} + \frac{d\psi_{yq}}{dt}. \qquad (4.15)$$

Электромагнитный момент, в зависимости от режима работы СМ — генераторный или двигательный, будет действовать соответственно против или в сторону вращения.

Для двигательного режима

$$M_{эм} = M_c + \frac{Jd^2\delta}{pdt^2}, \qquad (4.16)$$

где p — количество пар полюсов; M_c — момент сопротивления на валу; J — центральный момент инерции вращающихся масс.

Учитывая, что мощность двигателя

$$P = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C, \qquad (4.17)$$

после преобразований получим

$$M_{эм} = \frac{3}{2} P(\psi_d i_d - \psi_q i_q). \qquad (4.18)$$

Система уравнений (4.12) и (4.18) позволяет рассмотреть любой переходный процесс синхронной машины, если установить связь между потокосцеплениями и токами в обмотках.

4.3. Процессы возбуждения синхронной машины

Рассмотрим электромагнитный переходной процесс при включении обмотки возбуждения на постоянное напряжение при условиях, когда ротор СГ вращается с синхронной частотой, обмотка якоря разомкнута, демпферная обмотка отсутствует. Определим закономерность изменения напряжения в обмотке якоря.

В данном случае для всех величин начальные условия нулевые, поэтому их приращения одновременно являются полными величинами: $\Delta U_d = U_d$; $\Delta i_в = i_в$ и т. д. Обмотка возбуждения, если пренебречь влиянием вихревых токов и демпферной обмотки полюсов, представляет собой цепь с активным сопротивлением и индуктивностью и переходный процесс будет протекать аналогично (1.4). Ток возбуждения $i_в$ будет определяться только параметрами обмотки возбуждения (рис. 4.2).

$$i_{\text{в}} = i'_{\text{в}} + i''_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} - \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} \mathrm{e}^{-t/\tau_{\text{в}}}, \quad (4.19)$$

где $\tau_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}$ — постоянная времени обмотки возбуждения.

Составляющие напряжения обмотки якоря

$$U_{dt} = \frac{E_q}{\tau_{\text{в0}}} \mathrm{e}^{-t/\tau_{\text{в}}}; \; U_{qt} = E_q (1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_{\text{в}}}),$$

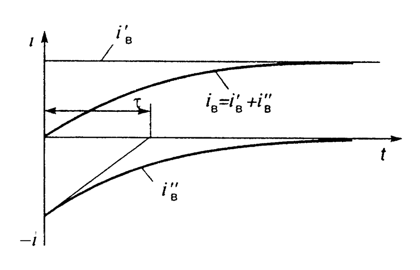


Рис. 4.2. Ток обмотки возбуждения при ее включении

где $E_q = X_{ad} i_{\text{в}}$ — установившаяся синхронная ЭДС по оси q.

Искомое напряжение фазы (например, A)

$$U_A = \frac{E_q}{\tau_{\text{в}}} \mathrm{e}^{-t/\tau_{\text{в}}} \cos(\omega t + \gamma_0) + E_q (1 - \mathrm{e}^{-t/\tau_{\text{в}}}) \sin(\omega t + \gamma_0), \qquad (4.20)$$

здесь первое слагаемое от U_d соответствует трансформаторной ЭДС, а второе (от U_q) — ЭДС вращения. Если принять во внимание, что для крупных СГ $\tau_{\text{в}} = 5 \div 10$ с $\approx 1500 \div 3000$ рад при $f_1 = 50$ Гц, в связи с медленным изменением тока $i_{\text{в}}$ трансформаторная ЭДС очень мала и ею можно пренебречь. На рис. 4.3 приведены графики изменения составляющих напряжения в функции времени, отражающие качественную сторону процесса.

Рассмотрим случай, когда ротор СГ снабжен демпферными обмотками. Поперечная составляющая демпферной обмотки не будет оказывать никакого влияния, так как она магнитно не связана с обмоткой возбуждения, а цепь обмотки якоря разомкнута.

Характер переходного процесса, связанный с продольной составляющей, будет аналогичным рассмотренному ранее (2.1), если

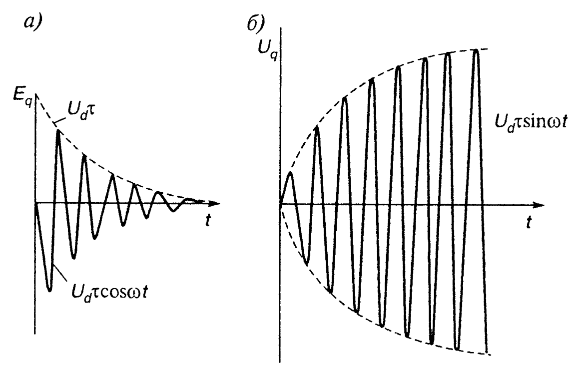


Рис. 4.3. Составляющие напряжения обмотки якоря

считать обмотку возбуждения за контур *1*, а продольную составляющую демпферной обмотки за контур *2*.

Изменение результирующего магнитного потока, которым наводится ЭДС в обмотке якоря при холостом ходе, будет проходить практически по экспоненте с постоянной времени

$$\tau_d = \tau_в + \tau_{yd},$$

где $\tau_в$ и τ_{yd} — постоянные времени соответственно обмотки возбуждения и продольной составляющей демпферной обмотки.

Следовательно, при наличии демпферной обмотки процесс нарастания напряжения в обмотке якоря протекает медленнее, чем при ее отсутствии, и трансформаторная ЭДС оказывается еще меньше. Практически процесс изменения напряжения в этом случае можно выразить уравнением

$$u_A = E_q (1 - e^{-t/\tau_d}) \sin(\omega t + \gamma_0). \qquad (4.21)$$

4.4. Гашение магнитного поля

При повреждениях, возникающих внутри СМ или на участке от ее выводов до ближайшего отключающего аппарата, единственным средством прекращения аварийного тока в машине является гашение ее магнитного потока. Обмотка возбуждения СМ обладает большим запасом электромагнитной энергии, и быстрое поглощение ее представляет сложную задачу.

Внезапный полный разрыв цепи возбуждения связан с возможностью возникновения перенапряжения, опасного для ее изоляции. Поэтому гашение поля осуществляют, например, путем переключения обмотки возбуждения на постоянное активное разрядное сопротивление $R_р$. При этом должно обеспечиваться минимальное время гашения поля $t_{гаш}$ и допустимое превышение напряжения на выводах обмотки возбуждения.

При отсутствии демпферных обмоток и разомкнутой обмотке якоря ток в обмотке возбуждения (рис. 4.4, *г*) будет затухать от своего начального значения $i_{в0}$ по апериодической кривой

$$i_в = i_{в0}\, e^{-t/\tau_{гаш}}, \qquad (4.22)$$

здесь $\tau_{гаш} = L_в/(R_в + R_р)$ — постоянная времени цепи гашения поля.

Напряжение на обмотке возбуждения $U_в$ пропорционально току возбуждения $i_в$. Максимальная величина напряжения при включении разрядного сопротивления

$$U_{вm} = \frac{R_р}{R_в} U_{в0}. \qquad (4.23)$$

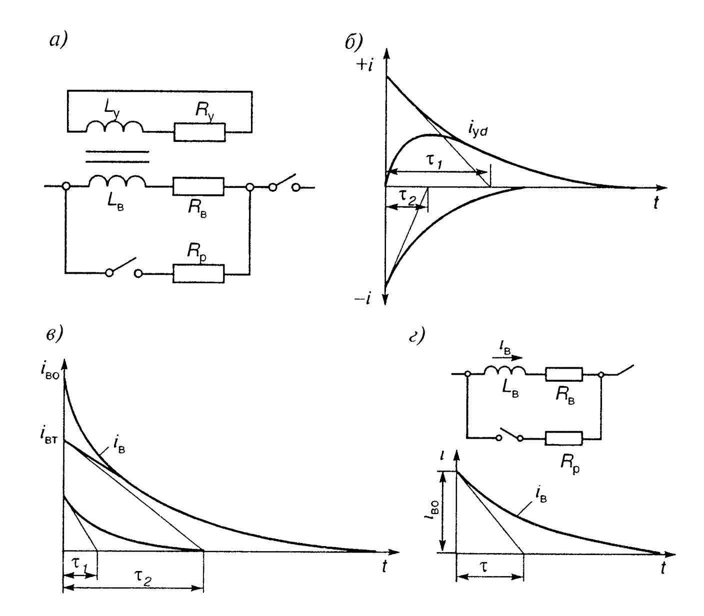


Рис. 4.4. Гашение поля синхронного генератора с демпферной обмоткой:

а — схема электрической цепи; *б* — токи демпферной обмотки; *в* — токи обмотки возбуждения; *г* — электрическая схема цепи и ток обмотки возбуждения СГ без демпферной обмотки на полюсных наконечниках

Чтобы ускорить гашение поля, следует увеличить разрядное сопротивление, которое по условию допустимого уровня напряжения $U_{доп}$ не должно превышать $R_р = U_{доп}/i_в$. Обычно $R_р = (3-5)R_в$.

Оптимальные условия гашения поля обеспечиваются при $i_в = i_{в0} - \frac{U_{доп}}{L_в} t$, т. е. ток $i_в$ должен снижаться по линейному закону, при этом время гашения

$$t_{гаш} = \frac{L_в}{U_{доп}} i_{в0}. \tag{4.24}$$

Наличие продольной демпферной обмотки (рис. 4.4, *а*) приводит к увеличению постоянной времени затухания магнитного потока $\tau_{гаш}$ и обусловленной им ЭДС обмотки якоря

$$\tau_{гаш} = \tau_{уd} + \tau_{в0} \frac{1}{1+K}, \tag{4.25}$$

где $K = R_р/R_в$. Время гашения поля при этом

$$t_{гаш} = \tau_{гаш} \ln (i_{в0}/i_{вгаш}). \tag{4.26}$$

Переходный процесс в этом случае можно представить в виде двух составляющих: медленной, затухающей с постоянной времени $\tau_1 = \tau_в$ и быстрой, затухающей с постоянной времени $\tau_2 = \tau_у$.

Ток демпферной обмотки (рис. 4.4, *б*)

$$i_{yd} = i_{ydm}(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}). \qquad (4.27)$$

Ток обмотки возбуждения (рис. 4.4, *в*)

$$i_в = i_{в0} e^{-t/\tau_1} + (i_{в0} - i_{в1}) e^{-t/\tau_2}, \qquad (4.28)$$

где $i_{в0}$ — начальное значение тока возбуждения; $i_{в1}$ — начальное значение медленно затухающего тока возбуждения.

Пример. Турбогенератор ТВ-100-2 имеет следующие параметры: $P_2 = 100$ МВт; $U_1 = 13{,}8$ кВ; $X_\sigma = 11$; $X_d = 1{,}8$; $X'_d = 0{,}203$; $X''_d = 0{,}138$; $X_{ad} = 1{,}69$; $X_в = 1{,}78$; $X_{yd} = 1{,}73$; $\tau_в = 9{,}75$ с; $\tau_{yd} = 3{,}2$ с; $R_в = 0{,}415$ Ом; $i_{в\ хх} = 270$ А; $i_{вн} = 650$ А; испытательное напряжение обмотки возбуждения 3200 В.

Определить время гашения поля при использовании разрядного сопротивления.

Напряжение на обмотке возбуждения в предшествующем режиме $U_{в0} = 0{,}415(2 \cdot 650) = 540$ В. Допустимое напряжение можно принять равным $U_{доп} = 0{,}7\ U_{исп} = 0{,}7 \cdot 3200 = 2240$ В. Необходимое разрядное сопротивление $R_р = R_в U_{доп}/U_{в0} = 0{,}415 \cdot 2240/540 = 1{,}72$ Ом. Постоянная времени при короткозамкнутой обмотке якоря $\tau'_в = \tau_в X'_d / X_d = 9{,}75 \cdot 0{,}203/1{,}8 = 1{,}1$ с.

$$\tau'_{yd} = \tau_{yd}\left(1 - \frac{X^2_{ad}}{X_{yd} X_d}\right) = 3{,}25\left(1 - \frac{1{,}69^2}{1{,}73 \cdot 1{,}8}\right) = 0{,}27 \text{ с.}$$

Постоянная времени гашения поля (4.16)

$$\tau_{гаш} = 0{,}27 + 1{,}1 \cdot \frac{1}{4{,}15 + 1} = 0{,}48 \text{ с.}$$

Ток возбуждения, при котором гаснет дуга переменного тока,

$$i_{вгаш} = i_{в\ хх} \frac{U_{гаш}}{U_н} = 270 \frac{0{,}15}{13{,}8} = 3 \text{ А.}$$

Следовательно, время гашения (4.17)

$$t_{гаш} = \tau_{гаш} \ln(i_{в0}/i_{вгаш}) = 0{,}48 \cdot \ln(2 \cdot 650/3) = 2{,}9 \text{ с.}$$

4.5. Внезапное трехфазное короткое замыкание

Под внезапным коротким замыканием (к.з.) понимают переходный режим, продолжающийся от начала к.з. обмотки якоря ($t = 0$) до достижения током установившегося значения. В момент к.з. в синхронном генераторе (СГ) возникает резкий бросок тока в обмотках якоря. Каждая физическая величина (ток, потокосцепление

и т. д.) при переходном процессе является суммой «вынужденной» или установившейся части и «свободной» или апериодической переходной части.

Как уже отмечалось, при разомкнутой обмотке якоря все переходные процессы в СМ были связаны с продольной осью ротора, т. е. они были неподвижны относительно ротора и затухали апериодически. При включенной (замкнутой) обмотке якоря переходные процессы возникают как в продольной, так и в поперечной оси. При этом каждая переходная величина распадается на две составляющие — неподвижную относительно ротора и неподвижную относительно якоря.

Неподвижная относительно ротора составляющая меняется по величине апериодически. Ей соответствуют переменные, апериодически изменяющиеся по амплитуде составляющие во всех трех фазах якоря, симметричные относительно ротора. Постоянные времени их затухания определяются главным образом сопротивлением (потерями) в обмотках ротора. Поэтому при рассмотрении симметричных составляющих, неподвижных относительно ротора, сопротивлением обмотки якоря можно пренебречь и потокосцепления обмотки якоря можно считать неизменными за это время.

Другие составляющие — неподвижные относительно якоря, меняются апериодически в неподвижных обмотках якоря. По отношению к ротору и осям d и q они являются периодическими (изменяющимися с частотой вращения ω) с апериодически изменяющейся амплитудой и называются «свободными» составляющими. Их величина определяется начальными условиями и поэтому зависит от значения периодической (симметричной) составляющей при $t=0$.

Очевидно, начальные значения апериодических составляющих будут различными в разных фазах, поскольку они смещены во времени в 3-фазном СГ на $2\pi/3$. Постоянная времени апериодической составляющей определяется главным образом потерями в обмотке якоря и почти не зависит от сопротивления обмоток ротора (ими обычно пренебрегают).

Если к моменту к.з. СГ работал без нагрузки, то при внезапном 3-фазном к.з. ток в фазе будет иметь три составляющие:

1-я — симметричная периодическая $i_{\text{ап}}$ с частотой ω_1;

2-я — апериодическая $i_{\text{аа}}$, зависящая от фазы включения θ_k при $\theta_k=\pi/2$, $i_{aa}=0$ при $\theta_k=0$, $i_{aa}=i_{aa\max}$;

3-я — ток двойной частоты, обусловленный неравномерностью воздушного зазора; в неявнополюсных СГ $X_d=X_q$, и эта составляющая отсутствует. Появление тока двойной частоты объясняется тем, что апериодическая составляющая неподвижна относительно статора, а трансформаторные связи статора и явнополюсного ротора в продольной и поперечной осях различны.

Условия к.з. в фазах A, B и C различны из-за сдвига θ_k на 120°.

Периодическая составляющая тока, появляющаяся в каждой фазе, создает периодическое поле, вращающееся синхронно с ротором. Это поле вызывает соответствующее увеличение поля возбуждения за счет появления в обмотке возбуждения апериодического тока $i_{ва}$ (рис. 4.5), накладывающегося на основной ток $i_в$. Ток $i_{ва}$ будет затухать с той же постоянной времени обмотки возбуждения, обусловливая уменьшение результирующего поля в зазоре, а следовательно — ЭДС $E_δ$ и тока $i_{ап}$ с той же постоянной времени обмотки возбуждения.

Апериодическая составляющая тока к.з. статора $i_{аа}$ (рис. 4.6) создает апериодическое поле, неподвижное в пространстве и затухающее с постоянной времени обмотки якоря τ_a. Это поле индуктирует во вращающейся обмотке возбуждения периодическую ЭДС $E_δ$ и ток $i_{вп}$ синхронной частоты, так же затухающие с постоянной времени $\tau_а$.

Периодическая составляющая тока возбуждения $i_{вп}$ создает поле, которое будет индуктировать в обмотке якоря ЭДС двойной частоты.

Действительная кривая тока возбуждения $i_в$ (рис. 4.7) представляет собой сумму токов $i_в = i_{в0} + i_{вп} + i_{ва}$.

Аналогично, действительная кривая тока якоря (рис. 4.8) представляет собой сумму токов $i_a = i_{ап} + i_{аа} + i_{a2}$.

Рассмотрим влияние демпферной обмотки на переходный процесс к.з. Появляющееся в момент к.з. и вращающееся с синхронной частотой поле якоря будет индуктировать в короткозамкнутой демпферной обмотке ротора апериодическую ЭДС и ток $i_{уа}$ (рис. 4.9), затухающие с постоянной времени $\tau_у \ll \tau_в$ (так как индуктивность $L_у \ll L_в$).

В процессе затухания тока $i_{уа}$ периодическая составляющая тока якоря $i_{ап}$ затухает быстро, с так называемой *сверхпереходной* посто-

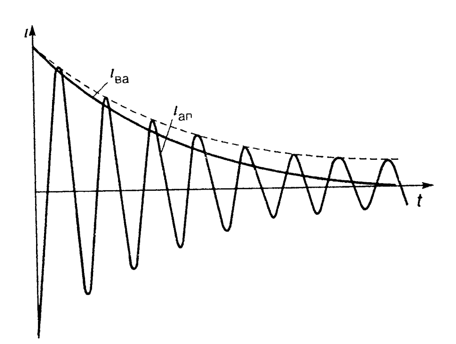


Рис. 4.5. Периодическая составляющая тока якоря $i_{ап}$ и апериодическая составляющая обмотки возбуждения $i_{ва}$ при к.з.СГ

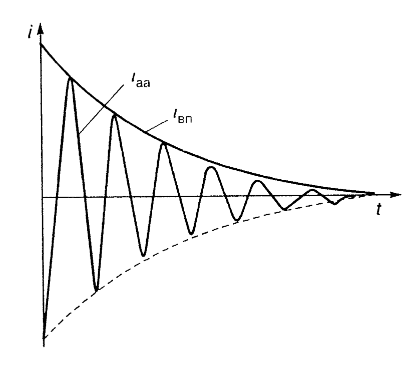


Рис. 4.6. Апериодическая составляющая обмотки якоря $i_{аа}$ и периодическая составляющая обмотки возбуждения $i_{вп}$ при к.з.СГ

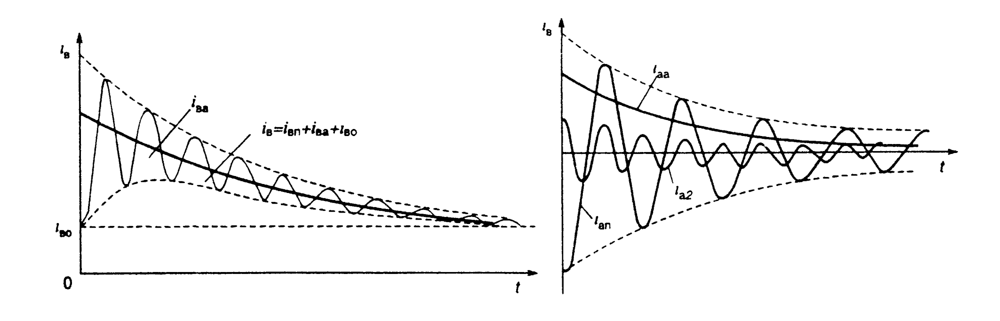


Рис. 4.7. Составляющие тока в обмотке возбуждения СГ при внезапном к.з.

Рис. 4.8. Составляющие тока в обмотке якоря СГ при внезапном к.з.

янной времени τ''_d (рис. 4.10, кривая *1*, участок *BC*), а после исчезновения тока $i_{уа}$ ток $i_{ап}$ будет затухать значительно медленнее (рис. 4.10, кривая *2*, после участка *AC*), с так называемой *переходной* постоянной времени τ'_d.

Следовательно, затухание тока якоря происходит от амплитуды сверхпереходного тока (рис. 4.10, отрезок 0*B*) до точки *C* с постоянной времени τ''_d, а далее от точки *C*, соответствующей полному затуханию тока в демпферной обмотке, с постоянной времени τ'_d. При отсутствии демпферной обмотки ток статора затухал бы от амплитуды переходного тока 0*A* с постоянной времени τ'_d (рис. 4.10, кривая *2*).

Сверхпереходные и переходные индуктивные сопротивления СГ. Магнитный поток реакции якоря $\Phi_а$ в установившемся режиме идет по тому же пути, что и основной поток взаимоиндукции. При

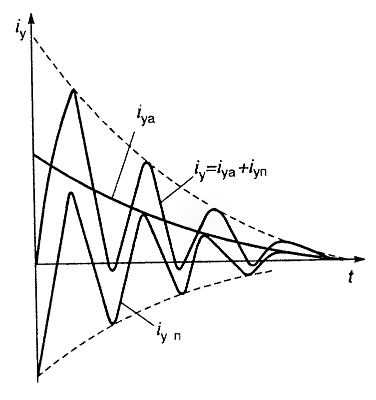


Рис. 4.9. Составляющие тока в демпферной обмотке СГ при внезапном к.з.

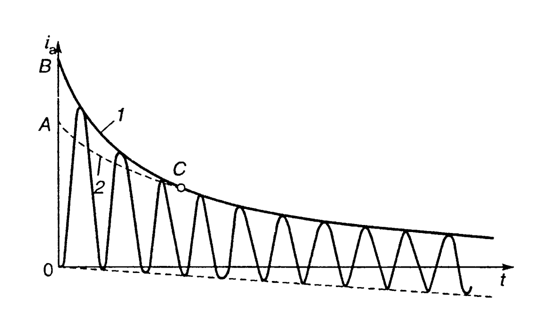


Рис. 4.10. Результирующий ток к. з. в цепи якоря СГ

внезапном к.з. в двух контурах (демпферной обмотке и обмотке возбуждения), находящихся на пути потока Φ_a, будут наводиться ЭДС и появятся токи, МДС которых в первый момент будет равна и противоположна по знаку МДС реакции якоря. Поэтому поток реакции якоря вытесняется в межполюсное пространство (рис. 4.11, *а*), магнитное сопротивление которого весьма велико. Это характеризует сверхпереходный режим. Постепенно процесс затухает. Так как $\tau_{у} \ll \tau_{в1}$, то поток реакции якоря вначале проникает в зону демпферной обмотки, что характеризует переходный режим (рис. 4.11, *б*), а затем и в зону обмотки возбуждения (рис. 4.11, *в*), после чего начинается режим установившегося короткого замыкания.

Значение индуктивного сопротивления СМ по продольной оси X_d в течение переходного процесса изменяется и для каждого момента времени может быть найдено из схем замещения (рис. 4.12).

В начальном сверхпереходном режиме схема замещения имеет вид, представленный на рис. 4.12, *а*, из которой найдем выражение для сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси

$$X''_d = X_{\sigma a} + \frac{1}{(1/X_{ad}) + (1/X_{\sigma в}) + (1/X_{\sigma y d})}, \tag{4.29}$$

по аналогии сверхпереходное сопротивление по поперечной оси

$$X''_q = X_{\sigma a} + \frac{1}{(1/X_{aq}) + (1/X_{\sigma y q})}. \tag{4.30}$$

Из схемы замещения СГ для переходного режима (рис. 4.12, *б*) определим переходное индуктивное сопротивление СГ по продольной оси

$$X'_d = X_{\sigma a} + \frac{1}{(1/X_{ad}) + (1/X_{\sigma в})}. \tag{4.31}$$

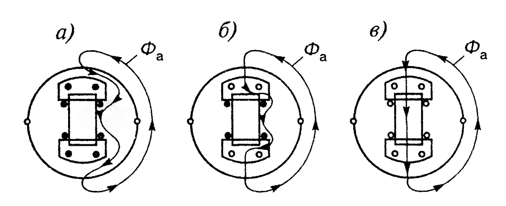


Рис. 4.11. Схемы путей магнитного потока реакции якоря при внезапном коротком замыкании СГ:

а — сверхпереходный режим; *б* — переходный режим; *в* — установившийся режим

Для поперечной оси, очевидно,

$$X'_q = X_q. \tag{4.32}$$

Для установившегося режима схема замещения СГ представлена на рис. 4.12, *в*, из которой найдем полное индуктивное сопротивление по продольной оси

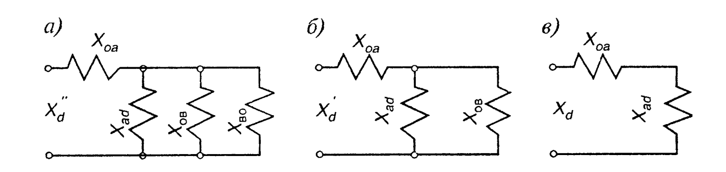


Рис. 4.12. Схема замещения СГ:

а — сверхпереходный режим; *б* — переходный режим; *в* — установившийся режим

$$X_d = X_{\sigma a} + X_{ad}$$

и соответственно для поперечной оси

$$X_q = X_{\sigma a} + X_{aq},$$

здесь $X_{\sigma a}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря; $X_{\sigma в}$ — то же, обмотки возбуждения; $X_{\sigma yd}$ и $X_{\sigma yq}$ — то же, демпферной обмотки по продольной и поперечной осям.

Амплитуда начального периодического тока, равная максимальной величине апериодического тока якоря СГ,

$$I_{апм} = I_{аам} = \frac{E_m}{X_d''} = \frac{\sqrt{2}E_0}{X_d''}; \tag{4.33}$$

при отсутствии демпферной обмотки

$$I_{апм} = I_{аам} = \frac{E_m}{X_d'} = \frac{\sqrt{2}\,E_0}{X_d'}. \tag{4.34}$$

В соответствии с постепенным изменением значения X_d в переходном процессе амплитуда периодической составляющей тока якоря будет уменьшаться от максимального значения, равного $\sqrt{2}E_0/X_d''$, до минимального установившегося значения, равного $\sqrt{2}E_0/X_d$.

Если к моменту короткого замыкания синхронный генератор с демпферной обмоткой работал без нагрузки, то при к.з. ток в фазе A

$$i_A = -E_{0A}\left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d}\right)e^{-t/\tau_d'} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'}\right)e^{-t/\tau_d''}\right]\cos(\omega t + \theta) +$$

$$+\frac{E_{0A}}{2}\left(\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''}\right)e^{-t/\tau_a''} + \frac{E_{0A}}{2}\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''}\right)\cos(2\omega t + \theta)\,e^{-t/\tau_a''}. \tag{4.35}$$

Аналогичные выражения могут быть составлены для токов

фаз B и C, соответственно прибавляя или вычитая от угла δ угол $2\pi/3$.

Из уравнения (4.35) видно, что ток фазы A, как отмечалось ранее, состоит из трех составляющих — периодической, апериодической и тока двойной частоты.

Наибольшее значение ток к.з. в фазе A, очевидно, будет иметь, когда $\cos\delta_0=\pm 1$, т. е. когда ось полюса ротора совпадает с осью фазы A. В этот момент потокосцепление фазы A максимальное, а ЭДС равна нулю.

Наибольшее из мгновенных значений тока переходного режима называется ударным током к.з. Кратность ударного тока (о.е.) при 3-фазном к.з.

$$i_{\text{уд}*}\simeq 1{,}8\cdot 1{,}05/X''_d, \tag{4.36}$$

здесь 1,8 — значение ударного коэффициента, с учетом затухания за 0,5 периода; 1,05 — величина ЭДС (о.е.).

В результате взаимодействия неподвижного апериодического поля статора с апериодическими токами роторных обмоток и с установившейся составляющей тока возбуждения $i_{\text{в}0}$ создается знакопеременный момент, имеющий частоту вращения, а также момент двойной частоты. Величина последней составляющей особенно значительна в явнополюсных СГ без демпферной обмотки.

Расчет механических сил ведется по ударному току к.з.

$$F_{\text{дин}*}\simeq (i_{\text{уд}*})^2. \tag{4.37}$$

Ток в обмотке возбуждения при внезапном к.з. определяется уравнением

$$i_{\text{в}}=i_{\text{в}0}\left\{1+\frac{X_{ad}}{X_{\sigma\text{в}}}\left[\left(1-\frac{X_{\sigma\text{a}}}{X'_d}\right)e^{-t/\tau'_d}-X_{\sigma\text{a}}\left(\frac{1}{X''_d}-\frac{1}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_d}-\right.\right.$$

$$\left.\left.-\left(1-\frac{X_{\sigma\text{a}}}{X''_d}\right)\cos(\omega t+\theta)\,e^{-t/\tau''_a}\right]\right\}. \tag{4.38}$$

Пример. Синхронный гидрогенератор мощностью $S_{\text{н}}=71\,500$ кВ·А; $f_1=50$ Гц; $2p=96$; $n_{\text{c}}=62{,}6$ об/мин; $GD^2=4700$ т.м^2; $X_d=0{,}695$; $X_q=0{,}507$; $X'_d=0{,}342$; $X''_d=0{,}241$; $X''_q=0{,}310$; $X_{\sigma a}=0{,}12$; $X_{\sigma\text{в}}=0{,}16$; $\tau'_d=1{,}35$; $\tau''_d=0{,}06$; $\tau''_q=0{,}05$; $\tau''_a=0{,}13$; $E_0=1{,}0$ (при $\cos\varphi=0{,}8$, $i_{\text{в}}=i_{\text{вн}}$, ненасыщенный режим) $\theta=16°40'$, $X_{ad}=0{,}575$.

Вычислить и построить графики зависимости токов в фазе A и токов в обмотке возбуждения от времени при внезапном трехфазном коротком замыкании генератора. Считать, что к.з. произошло при работе генератора на холостом ходу и при напряжении в фазе A, равном нулю, т. е. $\psi_A=0$. Определить, во сколько раз динамические усилия в лобовых частях обмотки якоря при внезапном к.з. будут больше, чем в номинальном режиме.

Для вычисления тока короткого замыкания в фазе A СГ с выделением его составляющих периодической, апериодической и тока двойной частоты воспользуемся уравнением (4.35), после преобразования которого получим

$$E_{0A}=1;$$

$$i_{A\text{п}}=-\left[\frac{1}{X_d}+\left(\frac{1}{X'_d}-\frac{1}{X_d}\right)e^{-t/\tau'_d}+\left(\frac{1}{X''_d}-\frac{1}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_d}\right]\cos\omega t=$$

$$=-\left[\frac{1}{0{,}695}+\left(\frac{1}{0{,}342}-\frac{1}{0{,}695}\right)e^{-t/1{,}35}+\left(\frac{1}{0{,}241}-\frac{1}{0{,}342}\right)e^{-t/0{,}06}\right]\cos\omega t;$$

$$i_{A\text{a}}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X''_d}+\frac{1}{X''_q}\right)e^{-t/\tau''_a}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}241}+\frac{1}{0{,}310}\right)e^{-t/0{,}13};$$

$$i_{A2}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X''_d}-\frac{1}{X''_q}\right)\cos 2\omega t\cdot e^{-t/\tau''_a}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}241}-\frac{1}{0{,}310}\right)\cos 2\omega t\cdot e^{-t/0{,}13};$$

$$i_A=i_{A\text{п}}+i_{A\text{a}}+i_{A2}.$$

Эту задачу можно решить, например, с помощью широко распространенных программируемых микрокалькуляторов или персонального компьютера. Для примера составим программу для ПК.

Программа расчета тока якоря i_A при внезапном к.з.

Исходные данные

```
Xd = 1.Ø5
Xsa = .12
Xsb = .16
Xdp = .275
Xdpp = .213
Xqpp = .345
Tdp = 1 35
Tdpp =  Ø6
Tapp = .13
f = 5Ø
Eoa = 1
ibØ = 1
'
'Расчет
omega = 2 * 3 14 * f
Xad = Xd - Xsa
t = Ø
LPRINT "Результаты расчетов"
LPRINT "
LPRINT "|  t  |  iAп  |  iAA  |  iA2  |  iA  ||  iвп  |  iва  |  iв  |
LPRINT "
WHILE t <=  5
  e1 = EXP(-t / Tdp)
  e2 = EXP(-t / Tdpp)
  e3 = EXP(-t / Tapp)
  coswt = COS(omega * t)
  cos2wt = COS(2 * omega * t)
  iap = -1*Eoa*(1/Xd+(1/Xdp-1/Xd)*e1+(1/Xdpp-1/Xdp)*e2)*coswt
  iaa = Eoa*.5*(1/Xdpp+1/Xqpp)*e3
  ia2 = Eoa* 5*(1/Xdpp-1/Xqpp)*cos2wt*e3
  ia = iap + iaa + ia2
  ibp = -Xad/Xsb*(1-Xsa/Xdpp)*coswt*e3
  iba = Xad/Xsb*((1-Xsa/Xdp)*e1-Xsa*(1/Xdpp-1/Xdp)*e2)
  ib = ibp + iba + ibØ
  LPRINT USING "|# ###"; t;
  LPRINT USING "|##.###"; iap;
  LPRINT USING "|##.###"; iaa;
  LPRINT USING "|##.###"; ia2;
  LPRINT USING "|##.###"; ia,
  LPRINT USING "||##.###"; ibp;
  LPRINT USING "|## ###"; iba;
  LPRINT USING "|##.###|"; ib
  IF t <=  1 THEN
    t = t + .ØØ1
   ELSEIF t <= .2 THEN
    t = t + .ØØ2
   ELSE t = t + .ØØ5
  END IF
WEND
LPRINT "
END
```

Расчет тока возбуждения при к.з. СГ для заданного момента времени t производим по уравнению (4.38), после преобразования которого получим

$$i_{\text{вп}} = -\frac{X_{ad}}{X_{\sigma\text{в}}}\left(1-\frac{X_{\sigma a}}{X''_d}\right)\cos\omega t\cdot e^{-t/\tau''_a} = -\frac{0,575}{0,16}\left(1-\frac{0,12}{0,241}\right)\cos\omega t\cdot e^{-t/0,13};$$

$$i_{\text{в}a} = \frac{X_{ad}}{X_{\sigma\text{в}}}\left[\left(1-\frac{X_{\sigma a}}{X'_d}\right)e^{-t/\tau'_d} - X_{\sigma a}\left(\frac{1}{X''_d}-\frac{1}{X'_d}\right)\cdot e^{-t/\tau''_d}\right]=$$

$$=\frac{0,575}{0,16}\left[\left(1-\frac{0,12}{0,342}\right)e^{-t/1,35} - 0,12\left(\frac{1}{0,241}-\frac{1}{0,342}\right)e^{-t/0,06}\right];$$

$$i_{\text{в}0}=1;$$

$$i_{\text{в}} = i_{\text{вп}} + i_{\text{в}a} + i_{\text{в}0}.$$

Результаты расчетов

t	$i_{a\text{п}}$	i_{aa}	i_{a2}	i_a	$i_{\text{вп}}$	$i_{\text{в}a}$	$i_{\text{в}}$
0.000	−4.695	3.797	0.898	0.000	−2.538	2.538	1.000
0.001	−4.447	3.768	0.721	0.042	−2.395	2.548	1.152
0.002	−3.768	3.739	0.274	0.245	−2.022	2.557	1.535
0.003	−2.728	3.710	−0.270	0.712	−1.459	2.567	2.108
0.004	−1.430	3.682	−0.704	1.548	−0.762	2.576	2.814
0.005	−0.004	3.653	−0.864	2.786	−0.002	2.585	3.583
0.006	1.412	3.625	−0.695	4.342	0.747	2.594	4.340
0.007	2.679	3.598	−0.265	6.012	1.411	2.602	5.014
0.008	3.675	3.570	0.259	7.504	1.929	2.611	5.539
0.009	4.306	3.543	0.677	8.525	2.251	2.619	5.870
0.010	4.513	3.516	0.832	8.860	2.350	2.627	5.977
0.011	4.278	3.489	0.669	8.436	2.219	2.635	5.854
0.012	3.629	3.462	0.256	7.347	1.875	2.643	5.517
0.013	2.631	3.435	−0.248	5.818	1.354	2.650	5.004
0.014	1.384	3.409	−0.650	4.142	0.709	2.658	4.367
0.015	0.011	3.383	−0.800	2.593	0.005	2.665	3.670
0.016	−1.354	3.357	−0.645	1.358	−0.688	2.672	2.984
0.017	−2.577	3.331	−0.248	0.507	−1.304	2.679	2.375
0.018	−3.540	3.306	0.237	0.003	−1.784	2.686	1.902
0.019	−4.152	3.280	0.625	−0.247	−2.083	2.692	1.609
0.020	−4.355	3.255	0.770	−0.330	−2.176	2.699	1.523
0.021	−4.133	3.230	0.621	−0.281	−2.056	2.705	1.649
0.022	−3.509	3.206	0.239	−0.064	−1.738	2.712	1.974
0.023	−2.548	3.181	−0.227	0.406	−1.256	2.718	2.461
0.024	−1.344	3.157	−0.601	1.212	−0.660	2.724	3.064
0.025	−0.017	3.132	−0.741	2.374	−0.008	2.729	3.721
0.026	1.303	3.108	−0.598	3.813	0.634	2.735	4.369
0.027	2.488	3.085	−0.231	5.341	1.205	2.741	4.945
0.028	3.423	3.061	0.218	6.702	1.650	2.746	5.396
0.029	4.019	3.038	0.577	7.634	1.928	2.751	5.679

Продолжение таблицы

t	$i_{ап}$	$i_{аа}$	$i_{а2}$	$i_{а}$	$i_{вп}$	$i_{ва}$	$i_{в}$
0.030	4.219	3.014	0.713	7.947	2.015	2.756	5.771
0.031	4.007	2.991	0.577	7.575	1.905	2.761	5.666
0.032	3.406	2.968	0.224	6.598	1.611	2.766	5.377
0.033	2.476	2.946	−0.208	5.213	1.166	2.771	4.937
0.034	1.310	2.923	−0.555	3.678	0.614	2.776	4.390
0.035	0.023	2.901	−0.686	2.238	0.011	2.780	3.791
0.036	−1.259	2.878	−0.555	1.064	−0.584	2.785	3.201
0.037	−2.411	2.856	−0.216	0.229	−1.113	2.789	2.676
0.038	−3.321	2.834	0.199	−0.288	−1.526	2.793	2.267
0.039	−3.903	2.813	0.533	−0.557	−1.784	2.797	2.013
0.040	−4.101	2.791	0.660	−0.650	−1.866	2.801	1.936
0.041	−3.899	2.770	0.535	−0.594	−1.764	2.805	2.041
0.042	−3.317	2.748	0.209	−0.359	−1.494	2.809	2.316
0.043	−2.414	2.727	−0.191	0.122	−1.082	2.813	2.731
0.044	−1.281	2.707	−0.513	0.913	−0.571	2.816	3.245
0.045	−0.029	2.686	−0.635	2.021	−0.013	2.820	3.807
0.046	1.220	2.665	−0.515	3.369	0.538	2.823	4.361
0.047	2.343	2.645	−0.202	4.786	1.028	2.827	4.855
0.048	3.233	2.625	0.183	6.040	1.411	2.830	5.241
0.049	3.802	2.604	0.493	6.900	1.651	2.833	5.485
0.050	3.999	2.584	0.611	7.194	1.727	2.836	5.564
0.051	3.804	2.565	0.497	6.865	1.635	2.839	5.474
0.052	3.239	2.545	0.196	5.980	1.385	2.842	5.227
0.053	2.361	2.525	−0.175	4.711	1.004	2.845	4.849
0.054	1.257	2.506	−0.474	3.289	0.531	2.848	4.379
0.055	0.035	2.487	−0.588	1.933	0.015	2.850	3.865
0.056	−1.185	2.468	−0.478	0.804	−0.496	2.853	3.357
0.057	−2.284	2.449	−0.189	−0.024	−0.950	2.855	2.905
0.058	−3.155	2.430	0.168	−0.557	−1.305	2.858	2.552
0.059	−3.714	2.412	0.455	−0.848	−1.528	2.860	2.332
0.060	−3.909	2.393	0.566	−0.950	−1.600	2.862	2.263

По результатам расчетов построены графики изменения токов в обмотке якоря (рис. 4.13) и в обмотке возбуждения (рис. 4.14).

Динамические усилия, возникающие в лобовых частях обмотки якоря ($F_{дин}$) при внезапном к.з., определяются ударным током $i_{уд}$, величину которого в о.е. можно принять равной

$$i_{уд}=\frac{1{,}05\cdot 1{,}8}{X''_d}=\frac{1{,}05\cdot 1{,}8}{0{,}241}=7{,}9 \text{ о.е.},$$

тогда

$$F_{дин}\simeq i_{уд}^2=7{,}9^2\simeq 63 \text{ о.е.},$$

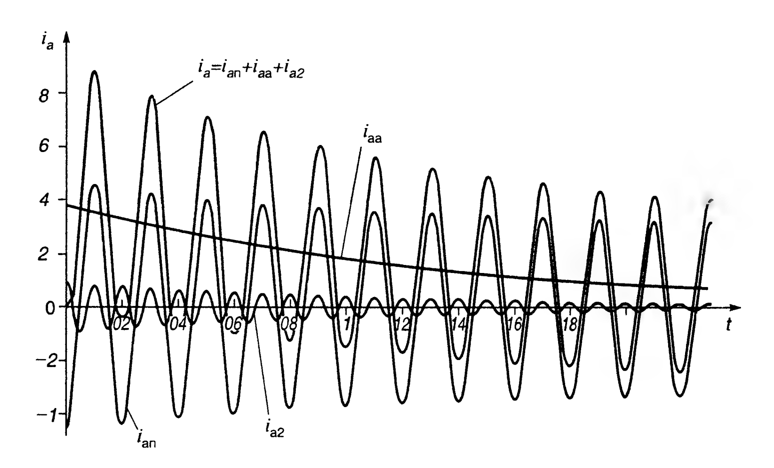


Рис. 4.13. Графики токов обмотки якоря СГ при внезапном коротком замыкании (к примеру расчета)

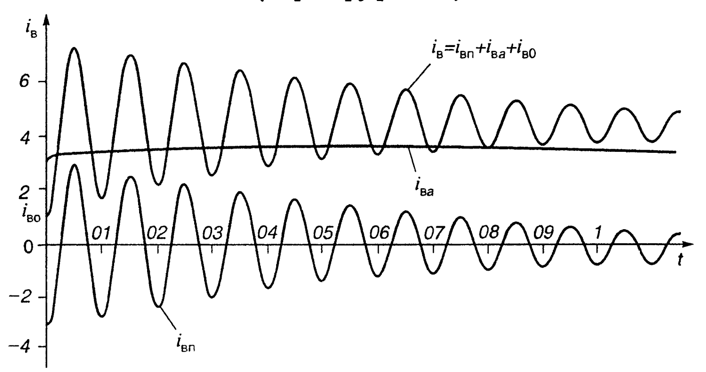


Рис. 4.14. Графики токов обмотки возбуждения СГ при внезапном коротком замыкании (к примеру расчета)

т. е динамические усилия в обмотке якоря при к.з. возрастут по сравнению с усилиями, действующими в номинальном режиме в 63 раза.

4.6. Внезапное несимметричное короткое замыкание

Рассмотрим начальный процесс двухфазного и однофазного короткого замыкания, пренебрегая затуханием токов в обмотках якоря и возбуждения. Предположим, к.з. произошло в момент, когда ось эквивалентной обмотки якоря была перпендикулярна продольной оси ротора, что будет соответствовать возникновению одного только периодического тока в обмотке якоря. Эквивалентная взаимная индуктивность M якорной и роторной обмоток не будет

постоянной, как и при 3-фазном к.з., а будет изменяться пропорционально $\sin\omega t$.

При повороте ротора на угол $\pi/2$ взаимная индуктивность достигнет максимума и при $\Phi_0=\text{const}$ возникнет наибольший всплеск тока в обмотке якоря $i_a=E_0/X'_d$ и в обмотке возбуждения $\Delta i_в \simeq \simeq (X_d-X'_d)\cdot i_{в0}/X'_q$, который при дальнейшем повороте ротора на угол π упадет до нуля.

В результате при наличии в обмотке якоря одной только периодической составляющей тока, в обмотке возбуждения будет, в отличие от 3-фазного к.з., возникать переменная добавочная составляющая тока возбуждения со значительным содержанием гармонических. Появление гармонических объясняется тем, что пульсирующая МДС якорной обмотки создает не только прямо, но и обратно вращающееся синхронное поле. Последнее индуктирует в обмотке возбуждения ток удвоенной частоты и ток третьей гармонической в обмотке якоря. Под влиянием сопротивления обмотки возбуждения потоки в СГ будут затухать и соответственно будут затухать токи в обмотке якоря.

Если внезапное двухфазное или однофазное к.з. началось в момент совпадения осей эквивалентной обмотки якоря и обмотки возбуждения, тогда взаимная индуктивность обмоток будет максимальной и в обмотке якоря появятся апериодическая составляющая тока и наибольшие начальные всплески токов, приближающиеся к двукратным значениям амплитуды периодической составляющей.

При наличии успокоительной обмотки на роторе или при массивном роторе (у турбогенераторов) обратносинхронное поле практически заглушается, гармонические токи в обмотке якоря практически исчезают и переходный процесс при двухфазном и однофазном к.з. мало отличается от трехфазного к.з. Кратность начального значения тока якоря будет зависеть при этом от величины апериодической составляющей тока. Если к.з. происходит в момент прохождения ЭДС обмотки якоря через нуль, то возникает максимально возможная апериодическая составляющая тока и наибольший возможный всплеск начального тока внезапного к.з.

При однофазном к.з. обмотка якоря создает пульсирующую МДС, поэтому появляется не только синхронное, но и обратносинхронное поле якоря, создающее в обмотках ротора токи удвоенной частоты.

При 2-фазном к.з. СГ с демпферной обмоткой, как и при 3-фазном к.з., переходный режим начнется со сверхпереходного процесса; амплитуды начальных значений периодической и апериодической составляющих тока якоря при этом будут равны

$$I''_{км}=\sqrt{3}\cdot\sqrt{2}E_0/(X''_d+X_2). \tag{4.39}$$

Для переходного процесса, наступающего после затухания токов в демпферной обмотке,

$$I'_{\text{км}}=\sqrt{3}\cdot\sqrt{2}E_0/(X'_d+X_2) \qquad (4.40)$$

наибольшее мгновенное значение тока к.з.

$$i_{A\max}=\sqrt{3}\cdot E_0\cdot 1{,}8/(X''_d+X_2), \qquad (4.41)$$

здесь X_2 — индуктивное сопротивление обратного следования фаз.

При однофазном к.з. амплитуда начальных значений периодической и апериодической составляющих тока к.з. для сверхпереходного режима

$$I''_{\text{км}}=3\cdot\sqrt{2}\cdot E_0/(X''_d+X_2+X_0). \qquad (4.42)$$

Для переходного режима

$$I'_{\text{км}}=3\cdot\sqrt{2}\cdot E_0/(X'_d+X_2+X_0). \qquad (4.43)$$

Максимальный пик тока фазы

$$i_{A\max}\simeq 1{,}8\cdot 3\cdot E_0/(X''_d+X_2+X_0), \qquad (4.44)$$

здесь X_0 — индуктивное сопротивление нулевого следования фаз.

4.7. Колебания синхронных машин

Специфической особенностью СМ является жесткая связь частоты вращения ротора и частоты питающего напряжения и способность ротора в определенных условиях совершать колебания около синхронной частоты.

Ротор СМ вместе с сочлененными с ним вращающимися элементами приводных устройств обладает динамическим моментом инерции J. Этот момент инерции совместно с синхронизирующим моментом СМ образует систему, которая может вынудить вращающийся ротор совершать колебания с некоторой частотой около синхронной частоты вращения $\Omega_c=2\pi f/p$ при нарушении равенства между вращающим моментом, приложенным к валу, и электромагнитным моментом СМ.

Колебания ротора СМ являются механическими, при которых упругие, связанные с электромагнитным моментом и инерционные силы непрерывно меняются по величине и знаку. Во время колебаний происходит непрерывное превращение потенциальной энергии, связанной с упругими силами, в кинетическую, связанную с инерционными силами, и обратно. При колебаниях обычно действуют также успокаивающая и демпфирующая силы, вызывающие затухание колебаний.

Одновременно с колебаниями частоты вращения ротора Ω происходят также колебания угла нагрузки θ. Каждой нагрузке СМ соответствует свой угол θ, соответствующий углу поворота оси полюсов относительно оси результирующего поля якоря и равный углу расхождения векторов E и U (рис. 4.15). Так, например, в процессе работы СМ от мощной сети с постоянной частотой при переходе от одной нагрузки M_1 к другой M_2 угол θ устанавливается не сразу, а после некоторого колебательного процесса. Колебания угла θ, в свою очередь, неразрывно связаны с колебаниями мощности и тока якоря и сопровождаются сложными электромагнитными переходными процессами, которые при неблагоприятных стечениях обстоятельств могут нарушить нормальную работу СМ.

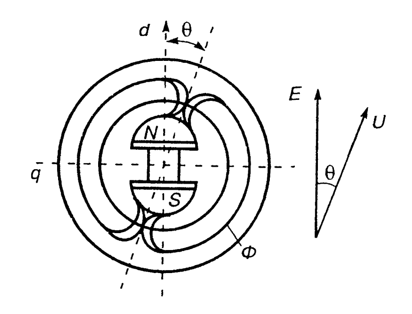


Рис. 4.15. Пространственная схема и векторная диаграмма синхронного генератора

Колебания бывают вынужденные и свободные.

Вынужденные колебания СМ возникают в случаях, когда механический момент на валу непостоянен и содержит пульсирующие составляющие. Они становятся особенно сильными и опасными, когда их частота близка к частоте собственных или свободных колебаний в связи с возможностью возникновения резонансных явлений. Для уменьшения вынужденных колебаний, например, в дизель-генераторах и двигателях, работающих с поршневыми компрессорами, устанавливаются дополнительные маховики.

Свободные или собственные колебания свойственны СМ при параллельной работе с сетью или другими СМ, так как в этих случаях они представляют собой колебательную систему. Свободные колебания возникают при всяких резких нарушениях или изменениях режима работы СМ (наброс или сброс нагрузки, изменения напряжения или тока возбуждения и пр.).

Изображенные на рис. 4.16 колебания возникают, например, при внезапном увеличении вращающего момента первичного двигателя. В этом случае угол нагрузки СГ возрастает от θ_1 до θ_2 и этот переход происходит при колебаниях с начальной амплитудой, равной $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$.

Частота собственных колебаний СМ f_0 обычно составляет 0,5...2 Гц. Успокоительный момент СМ создается главным образом за счет токов, индуктируемых в обмотках возбуждения и демпферной при колебаниях ротора. Наиболее эффективным средством успокоения колебаний является применение полной демпферной обмотки.

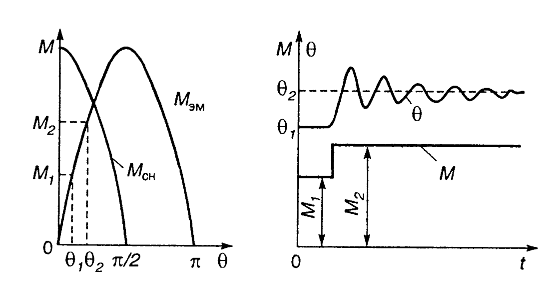


Рис. 4.16. Колебания синхронной машины:
а — угловая характеристика; *б* — диаграмма изменения угла θ при набросе нагрузки

Если отклонение угла θ от его среднего значения $\theta_{ср}$, равное α, менее 20 эл. град, то выражение для электромагнитного момента при колебаниях может быть представлено в следующем виде:

$$M_{эм} \approx \frac{mE_0U}{\Omega_{ср}X_d} \cdot \sin\theta_{ср} + \frac{mE_0U}{\Omega_{ср}X_d} \cdot \cos\theta_{ср} < \alpha = M_{эм.ср} + M_{сн} \cdot \alpha, \qquad (4.45)$$

здесь $\Omega_{ср} = \omega_{ср}/p$ — механическая угловая частота вращения ротора; $M_{эм.ср}$ — средний электромагнитный момент, уравновешиваемый моментом на валу, а $M_{сн} \cdot \alpha$ — неуравновешенный добавочный момент на валу, называемый синхронизирующим, под воздействием которого ротор получает ускорение, стремящееся привести его в положение, при котором момент на валу и электромагнитный момент уравновешивают друг друга.

Величина $M_{сн} = mE_0U\cos\theta_{ср}/(\Omega_{ср}X_d)$ называется коэффициентом синхронизирующего момента.

В общем случае при колебаниях СМ работающий параллельно с мощной сетью приложенный к валу машины внешний момент M уравновешивает следующие внутренние моменты:

а) электромагнитный момент

$$M_{эм} = mE_0U \cdot \sin\theta_{ср}/(\Omega_{ср}X_d);$$

б) инерционный момент

$$M_j = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{p}\left[\frac{d^2(\theta_{ср} + \alpha)}{dt^2}\right] = \frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2};$$

в) синхронизирующий момент $M_с$, пропорциональный при малых колебаниях отклонению α угла θ от среднего его значения $\theta_{ср}$; $M_с = M_{сн} \cdot \alpha$;

г) успокоительный момент $M_у$, при малых колебаниях пропорциональный скорости изменения угла α

$$M_у = K_у \frac{d\alpha}{dt},$$

где $J=GD^2/4g$ — момент инерции вращающихся масс; $g=9{,}81$ м/с^2 — ускорение силы тяжести; α — угол отклонения θ от среднего значения; $K_у$ — коэффициент успокоительного момента.

Таким образом,

$$M=M_{эм}+M_j+M_с+M_у.$$

Частота свободных колебаний ротора

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{P_{сн}}{\omega_{сн}}\cdot\frac{p^2}{J}}. \qquad (4.46)$$

Принимая во внимание, что период свободных колебаний $T_0=1/f_0$, а номинальная частота вращения $n_н=\frac{60f_0}{p}=\frac{60\omega_с}{2\pi p}$, период свободных колебаний равен

$$T_0\simeq 1{,}02\sqrt{\frac{GD^2 n_н}{gpP_{сн}}}. \qquad (4.47)$$

Эту же величину можно выразить через инерционную постоянную H_j (с), представляющую собой время, в течение которого ротор с маховой массой GD^2 (кг·м^2) из состояния покоя доводится до номинальной частоты вращения $n_н$ (об/мин), под воздействием постоянной мощности, равной номинальной мощности машины $P_н$ (кВ·А)

$$H_{jp}=\frac{J\Omega_с^2}{2P_н}=\frac{1}{102}\frac{GD^2}{2\cdot 4g}\left(\frac{2\pi n_н}{60}\right)^2\frac{1}{P_н}=1{,}37\frac{GD^2}{P_н}n_н^2\cdot 10^{-6}. \qquad (4.48)$$

Или, если исходить из момента, соответствующего номинальной мощности (кВ·А), то

$$H_{jm}=2H_{jp}. \qquad (4.49)$$

В этом случае, при $f_1=50$ Гц, период свободных колебаний

$$T_0=0{,}355\sqrt{H_{jm}\frac{P_н}{P_{сн}}}. \qquad (4.50)$$

Период собственных колебаний T_0 зависит от режима работы СМ. Увеличение возбуждения приведет к увеличению ЭДС E_0 и при неизменной нагрузке к уменьшению угла $\theta_{ср}$, увеличению коэффици-

ента синхронизирующей мощности и уменьшению периода колебаний T_0.

Величина $P_{\text{сн}}=dP/d\theta$ называется коэффициентом синхронизирующей мощности. Для неявнополюсных СМ

$$P_{\text{сн}}=\frac{mE_0U}{X_d}\cos\theta, \qquad (4.51)$$

а для явнополюсных СМ

$$P_{\text{сн}}=\frac{mE_0U}{X_d}\cos\theta+mU^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\cos2\theta. \qquad (4.52)$$

Коэффициент синхронизирующего момента

$$M_{\text{сн}}=P_{\text{сн}}/\Omega. \qquad (4.53)$$

Коэффициенты $P_{\text{сн}}$ и $M_{\text{сн}}$ положительны для устойчивых областей работы и отрицательны для неустойчивых.

Пример. Синхронный гидрогенератор (18) мощностью $S_{\text{н}}=71\,500$ кВ·А; $f_1=50$ Гц; $2p=96$; $n_{\text{н}}=62{,}6$ об/мин; $GD^2=4700$ т·м²; $X_d=0{,}695$; $X_q=0{,}507$; $E_0=1{,}58$ (при $\cos\varphi=0{,}8$, $i_{\text{вн}}$, ненасыщенный режим); $\theta=16°40'$; $U=1{,}0$; $X_{\sigma 0}=0{,}12$; $X_{\sigma\text{в}}=0{,}16$.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}}=\frac{mEU}{X_d}\sin\theta+\frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin2\theta=$$

$$=\frac{3\cdot1{,}58\cdot1{,}0}{0{,}695}\sin16°40'+\frac{3\cdot1{,}0^2}{2}\left(\frac{1}{0{,}507}-\frac{1}{0{,}695}\right)\sin(2\cdot16°40')=1{,}94+0{,}44\simeq2{,}4.$$

Номинальная мощность СГ в относительных единицах

$$P_{\text{н}}=mI_{\text{н}}U_{\text{Н}}\cos\varphi=3\cdot1{,}0\cdot1{,}0\cdot0{,}8=2{,}4.$$

Коэффициент синхронизирующей мощности

$$P_{\text{сн}}=\frac{mE_0U}{X_d}\cos\theta+mU^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\cos2\theta=\frac{3\cdot1{,}58\cdot1{,}0}{0{,}695}\cos16°40'+$$

$$+3\cdot1{,}0^2\left(\frac{1}{0{,}507}-\frac{1}{0{,}695}\right)\cos(2\ 16°40')=6{,}53+1{,}33=7{,}86.$$

Инерционная постоянная

$$H_{jm}=2{,}74\frac{GD^2}{S_{\text{н}}}n_{\text{н}}^2\ 10^{-6}=2{,}74\frac{47000\cdot10^3\ 62{,}5^2}{71\,500}\ 10^{-6}=7{,}04\ \text{с}.$$

Период собственных колебаний ротора для номинального режима работы при номинальной мощности

$$T_0=0{,}355\sqrt{H_{jm}\frac{P_н}{P_{сн}}}=0{,}355\sqrt{7{,}04\frac{2{,}4}{7{,}86}}=0{,}52 \text{ с.}$$

При работе синхронного генератора в одиночку отсутствует фактор, обеспечивающий постоянство величины и частоты напряжения на его зажимах. Поэтому при вынужденных колебаниях, обусловленных изменением частоты вращения первичного двигателя, угол θ между векторами E_0 и U остается постоянным.

Колебания ротора, как и в случае свободных колебаний, индуктируют в обмотке якоря ЭДС частоты колебаний. Амплитуда колебаний обратно пропорциональна квадрату порядка гармонической. Наибольшее отклонение угла α_{max} примерно равно алгебраической сумме амплитуд всех гармонических, и его величину можно ограничить только путем увеличения момента инерции $J_у$, что в ряде случаев обеспечивают насадкой на вал специального маховика.

Пример. Определить маховой момент дополнительного маховика, который следует насадить на вал генератора с параметрами, указанными в предыдущем примере, для уменьшения частоты собственных колебаний в полтора раза.

Период собственных колебаний СГ $T_0=0{,}52$ с, что соответствует частоте $f_0=1/T_0=1/0{,}52=1{,}92$ Гц и инерционной постоянной $H_{jm}=7{,}04$ с.

Для снижения частоты собственных колебаний до $f_0'=f_0/1{,}5=1{,}92/1{,}5=1{,}28$ Гц и $T_0'=T_0\cdot 1{,}5=0{,}52\cdot 1{,}5=0{,}78$ с инерционная постоянная из (4.50) должна быть равна

$$H_{jm}'=\frac{(T_0')^2 P_{сн}}{P_н\cdot 0{,}355^2}=\frac{0{,}78^2\cdot 7{,}86}{2{,}4\cdot 0{,}355^2}=15{,}8 \text{ с.}$$

Тогда из (4.48) и (4.49) найдем необходимый результирующий маховой момент

$$\frac{GD_1^2}{(GD_1^2)'}=\frac{H_{jm1}}{H_{jm2}};\ GD_1^{2\prime}=\frac{GD_1^2 H_{jm2}}{H_{jm1}}=\frac{4700\cdot 15{,}8}{7{,}04}=10\,500 \text{ т}\cdot\text{м}^2.$$

Следовательно, маховой момент дополнительного маховика должен быть равен

$$(GD_1^2)'-GD_1^2=10\,500-4700=5800 \text{ т}\cdot\text{м}^2.$$

4.8. Асинхронный пуск синхронного двигателя

Включение синхронной машины в сеть связано с необходимостью ее синхронизации, включающей в себя ряд сложных операций. Наиболее простым и распространенным является метод асинхронного пуска с последующей самосинхронизацией, при котором СМ включается в сеть в невозбужденном состоянии и исключается необходимость точного выравнивания частот, величины и фазы

напряжений. При частоте вращения, близкой к синхронной, включают возбуждение и СМ втягивается в синхронизм.

При асинхронном пуске СМ, имеющих значительные моменты инерции вращающихся частей, особое значение приобретает термическая стойкость СМ и связанное с ней допустимое время пуска.

Время пуска СМ $t_п$ из неподвижного состояния до номинальной частоты вращения $n_н$ приближенно можно определить по пусковому моменту $M_п$, моменту сопротивления $M_{ст1}$, приведенному к валу двигателя, и маховому моменту всех вращающихся масс электропривода GD^2.

$$t_п=27{,}4GD^2\left(\frac{n_н}{100}\right)^2\left[M_п\left(1-\frac{M_{ст}}{M_п}\right)\right] \quad (4.54)$$

или, пользуясь механической постоянной времени электропривода $T_м=27{,}4GD^2\left(\frac{n_н}{100}\right)^2/M_н$, время пуска

$$t_п=T_м/\left[\frac{M_п}{M_н}\left(1-\frac{M_{ст}}{M_п}\right)\right], \quad (4.55)$$

здесь $1-\frac{M_{ст}}{M_п}=K_и$; $K_и$ — коэффициент избыточного момента вращения.

Тогда нагрев пусковой обмотки может быть определен как разность энергии, потребляемой из сети,

$$t_пM_п=T_мM_н\frac{1}{K_и} \quad (4.56)$$

и энергии, израсходованной в приводе за время пуска, равное $0{,}5T_м\cdot M_нI/K_и$, т. е. при пуске из неподвижного состояния в роторной обмотке выделяется энергия

$$Q_р=\frac{1}{2}T_мM_н\frac{1}{K_и}.$$

Зная среднюю тепловую нагрузку обмотки ротора при пуске W (Вт/см^2) для поверхности пусковых стержней, превышение их температуры с учетом теплоотдачи к стали будет равно

$$v_с=WC(1-e^{-t_п/T_с}), \quad (4.57)$$

где $C=20\div100$ к·см²/Вт — удельное тепловое сопротивление между пусковыми стержнями и сталью.

Постоянная времени нагревания (с) для круглых медных стержней (при $C\simeq50$)

$$T_c=\frac{d_c\cdot3{,}5\cdot50}{4}=44d_c,$$

здесь 3,5 Вт·с/(см³·К) — удельная объемная теплоемкость меди; d_c, см — диаметр стержня.

Полагая, что все тепло скольжения при пуске выделяется в стержнях пусковой обмотки, получим

$$v=35GD^2\left(\frac{n_н}{100}\right)^2/(G\cdot K_н), \tag{4.58}$$

здесь $35=\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{60}\right)^2\cdot\frac{10^7}{390}$; 390, Вт·с/(кг·К) — удельная теплоемкость меди и латуни.

При необходимости учета тепловыделения в других частях ротора полученный результат умножают на поправочный коэффициент $K_к=0{,}84\div0{,}9$.

Превышение температуры пусковой обмотки может быть выражено через время пуска

$$v=1{,}28\frac{t_пM_п}{G}K_к, \tag{4.59}$$

здесь G (кг) — масса пусковой обмотки.

Пользуясь этим выражением, можно определить допустимую продолжительность пуска $t_{п\,max}$, задаваясь допустимым превышением температуры v_{max}

$$t_{п\,max}=0{,}78\frac{v_{max}}{K_к}\cdot\frac{G}{M_п}. \tag{4.60}$$

Если принять для СМ $v_{max}/K_к=300$ °C, то

$$t_{п\,max}=235G/M_п. \tag{4.61}$$

Таким образом, значение $t_{п\,max}$ в основном зависит от отношения массы пусковой обмотки к среднему пусковому моменту вращения и колеблется в широких пределах. Меньшие значения $t_{п\,max}$ относятся к быстроходным мощным двигателям, так как масса пусковой обмотки в них относительно мала. Сравнение массы пусковой

обмотки СД и короткозамкнутой обмотки ротора АД показывает, что масса последних в 2 — 2,5 раза больше.

Превышение температуры статорной обмотки приближенно (при плотности тока $j_п$) равно

$$v_{ст} \approx \frac{j_п^2}{175} t_п. \qquad (4.62)$$

Так, для СД с классом нагревостойкости изоляции B, $v_{c\max} = 60$ °С при начальной пусковой плотности тока $j_{пн}$ допустимое время пуска

$$t_{п\max} = \frac{10\,500}{j_{пн}^2}. \qquad (4.63)$$

Для синхронных машин средней мощности (100÷250 кВт) при пусковых плотностях тока в обмотке статора около 23 А/мм^2 и кратности среднего пускового момента около 1,4 максимальное время пуска составляет 4÷12 с. Причем меньшие значения $t_п$ относятся к более быстроходным машинам, а ограничение $t_{п\max}$ определяется пусковой обмоткой.

После разгона двигателя до частоты вращения, близкой к синхронной, включают возбуждение. Процесс втягивания в синхронизм начинается с момента включения возбуждения и заканчивается при достижении синхронной частоты вращения.

Уравнение моментов вращения СМ в относительных единицах в операторной форме имеет вид

$$T_м p^2 \delta + M_d p \delta + \int_0^\delta M_{сн} d\delta = M_{ст},$$

здесь p — оператор Хэвисайда; $M_у$ и $M_{сн}$ — соответственно коэффициенты демпфирующего и синхронизирующего моментов в о.е.; $M_{ст}$ — момент сопротивления привода, о.е.; $T_м$ — механическая постоянная времени привода.

$$T_м = 2\pi f_1 \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 \frac{GD^2 n^2}{P_н}, \qquad (4.64)$$

где GD^2 — маховый момент привода, т·м^2; $P_н$ — номинальная мощность, кВ·А.

Если пренебречь моментом сопротивления, постоянными составляющими и вторыми гармоническими электромагнитного момента вращения и принять

$$\int_0^\delta M_{\text{сн}} d\delta \approx \frac{E_d}{K_d}\sin\delta, \text{ а } \frac{d\delta}{dt}=s, \text{ то можно написать}$$

$$\frac{T_{\text{м}}}{2}ds^2=\frac{E_d}{X_d}\cdot d(\cos\delta),$$

т. е. изменение квадрата скольжения за период втягивания в синхронизм равно работе синхронизирующих сил.

Решая это уравнение, найдем наибольшее допустимое скольжение, при котором еще возможно втягивание в синхронизм

$$s_{\max}=2\sqrt{P_{\max}/T_{\text{м}}}, \tag{4.65}$$

здесь $P_{\max}=E_d/X_d$; реактивный момент принят равным нулю, и асинхронный момент вращения до втягивания в синхронизм уравновешивает момент сопротивления $M_{\text{ст}}$. При изменении скольжения от $s_{\max}$ асинхронный момент меняется от $M_{\text{ст}}$ до нуля. В итоге для синхронной машины с явновыраженными полюсами, без учета второй гармонической в асинхронном моменте, можно принять

$$s_{\max}=2\sqrt{\frac{P_{\max}-0{,}6M_{\text{ст}}}{T_{\text{м}}}}. \tag{4.66}$$

Критическое скольжение, при котором обеспечивается втягивание в синхронизм при включенном возбуждении в относительно невыгодный момент времени,

$$s_{\text{кр}}\leqslant 1{,}05\sqrt{\frac{P_{\max}}{T_{\text{м}}}}. \tag{4.67}$$

В упрощенном виде условие втягивания в синхронизм записывается в виде

$$M_{\text{ст}}\leqslant M_{\text{у}}s_{\text{кр}}. \tag{4.68}$$

Пример. Синхронный двигатель мощностью $S=780$ кВ·А; $U=6000$ В; $I=75{,}1$ А; $\cos\varphi=0{,}8$; $M_{\text{ст}}=582$ кг·м; $2p=6$; $f_1=50$ Гц.

Пусковая клетка: число стержней на полюс $n_{\text{у}}=6$; $d_{\text{с}}=12$ мм; $l_{\text{в}}=620$ мм; латунь, плотность тока $j_{\text{у}}=5{,}68$ А/мм^2. Кратность пускового тока, $K_{\text{п1}}=5{,}7$; кратность среднего пускового момента $M_{\text{пср}}/M_{\text{н}}=2{,}6$; суммарный маховый момент ротора и приводного механизма $GD^2=1{,}5$ т·м^2; средний момент сопротивления $M_{\text{ст}}=0{,}3M_{\text{н}}$.

Требуется определить условия асинхронного пуска двигателя.

Механическая постоянная времени привода

$$T_м=\frac{27{,}4GD^2\left(\frac{n_н}{100}\right)^2}{M_н}=\frac{27{,}4\cdot 1{,}5\left(\frac{1000}{100}\right)^2}{582}=7{,}1\ с.$$

Коэффициент избыточного момента

$$K_и=1-\frac{M_{ст}}{M_п}=1-\frac{0{,}3}{2{,}6}=0{,}885.$$

Время пуска СД

$$t_п=T_м\frac{1}{\frac{M_п}{M_н}\left(1-\frac{M_{ст}}{M_п}\right)}=T_м\frac{M_н}{M_{пср}}\cdot\frac{1}{K_и}=7{,}1\frac{1}{2{,}6}\cdot\frac{1}{0{,}885}=3{,}08\ с.$$

Масса стержней

$$G=\frac{\pi d^2}{4}l_в\cdot n_в\cdot 2p\cdot 8{,}5\cdot 10^{-6}=\frac{\pi\cdot 12^2}{4}\cdot 620\cdot 6\cdot 6\cdot 8{,}5\cdot 10^{-6}=21{,}4\ кг.$$

Повышение температуры пусковой обмотки за время пуска, полагая, что нагрев стержней происходит адиабатически,

$$v=\frac{35GD^2\left(\frac{n_н}{100}\right)^2}{G\cdot K_и}=\frac{35\cdot 15\cdot 100}{21{,}4\cdot 0{,}885}=277\ °C.$$

Предельно допустимое время пуска

$$t_{п\max}=235\frac{G}{M_п}=235\frac{21{,}4}{2{,}6\cdot 582}=3{,}34\ с.$$

Нагрев статорной обмотки

$$v=\frac{(j_пK_{п1})^2t_п}{175}=\frac{(5{,}68\cdot 5{,}7)^2\cdot 3{,}08}{175}=18{,}5\ °C.$$

Предельно допустимое время пуска по нагреву статорной обмотки

$$t'_{п\max}=\frac{7850}{(J_{пн}K_{п1})^2}=\frac{7850}{(5{,}68\cdot 5{,}7)^2}=7{,}5\ с,$$

т. е. в данном случае время пуска ограничено нагревом пусковой обмотки ротора.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под продольной и поперечной осями СМ?
2. Какие взаимосвязанные магнитные контуры имеются в СМ?
3. Какие допущения могут вводиться при анализе переходных процессов в СМ?
4. Какое влияние на переходные процессы в СМ оказывает насыщение магнитной цепи?

5. Какова роль магнитных потерь в переходных процессах СМ?

6. Что понимают под параметрами симметричных и несимметричных режимов работы СМ?

7. Чем различаются параметры СМ в установившихся и переходных режимах?

8. В чем заключаются особенности уравнений Горева — Парка?

9. Что понимают под электромагнитной и электромеханической постоянной времени электрической машины?

10. Какие основные факторы оказывают влияние на процесс возбуждения СМ?

11. Что понимают под гашением поля СМ?

12. Чем определяются оптимальные условия гашения поля СМ?

13. Чем характеризуется внезапное к.з. СГ?

14. Назовите основные составляющие тока к.з. в фазе СГ и условия их возникновения.

15. В чем заключаются особенности переходных процессов при несимметричном и симметричном к.з. СГ?

16. Чем обусловлено появление тока двойной частоты в обмотке якоря при внезапном к.з.?

17. Чем обусловлено появление периодической составляющей тока в обмотке возбуждения при к.з. СГ?

18. Что понимают под ударным током к.з. СГ?

19. Как протекают переходные процессы в отдельных фазах при внезапном 3-фазном к.з. СГ?

20. Назовите причину возникновения свободных и вынужденных колебаний СМ.

21. Чем опасны колебания СМ?

22. Назовите способы ограничения колебаний СМ.

Глава 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Особенности переходных процессов в машинах постоянного тока

5.1.1. Характеристика намагничивания. Реакция якоря. Реакция добавочных полюсов

Возникновение переходных процессов в электрических машинах постоянного тока (МПТ), как и в других машинах, связано с изменением состояния и режима их работы и обусловлено накоплением или рассеянием электромагнитной энергии в их цепях и механической энергии вращающихся масс в процессе перехода от одного установившегося состояния к другому. Переходные процессы в МПТ относятся к категории наиболее сложных.

Энергия магнитного поля МПТ определяется конструкцией элементов магнитной цепи и индуктивностями обмоток, а механическая энергия — маховым моментом инерции якоря.

От характера протекания переходных процессов существенно зависит надежность работы МПТ и связанных с нею устройств.

В свою очередь, характер переходных процессов в МПТ зависит от многих факторов, основными из которых являются нелинейность характеристик намагничивания систем главных и дополнительных полюсов, взаимная индукция цепей якоря и возбуждения, реакция якоря, вихревые токи в массивных частях магнитопровода, изменение переходного падения напряжения в щеточном контакте, изменение частоты вращения якоря.

Учет всех этих факторов, особенно влияния реакции якоря на магнитный поток главных полюсов, насыщения магнитной цепи и вихревых токов, сопряжен со значительными трудностями.

При практическом решении задач, связанных с исследованием и анализом переходных процессов в МПТ, вводят ряд упрощающих допущений.

Характеристика намагничивания. При анализе переходных процессов в МПТ одним из основных параметров является индуктивность обмоток якоря, которая вследствие нелинейности характеристики намагничивания машины оказывается величиной переменной. Так, при увеличении магнитной индукции от 0,3 до 2,0 Тл индуктивность обмотки якоря МПТ в ряде случаев уменьшается почти в 5 раз. Наибольшее значение при этом имеет насыщение зубцовой зоны якоря. Известен ряд способов учета нелинейности характеристики намагничивания. Так, при упрощенных расчетах нелинейная характеристика МПТ $\Phi=f(i_в)$ может быть выражена уравнением гиперболы $i_в=\varphi/(a+b\varphi)$, при $\varphi=\Phi/\Phi_н$ о.е.

При необходимости получения более достоверных результатов используют метод кусочно-линейного аппроксимирования, при котором характеристику намагничивания аппроксимируют несколькими, обычно тремя, прямолинейными отрезками (рис. 5.1). В пределах каждого такого отрезка значения индуктивностей L_{f1}, L_{f2} и L_{f3} принимаются неизменными.

Реакция якоря. Реакция якоря в МПТ оказывает существенное влияние на магнитное поле главных полюсов. Она проявляется в виде действия поперечной и продольной составляющих МДС реакции якоря, увеличения насыщения отдельных участков магнитопровода и т. д.

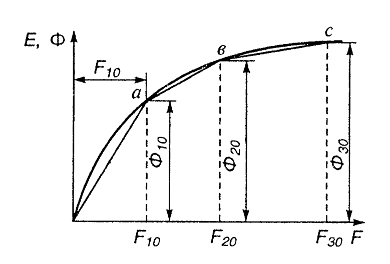


Рис. 5.1. Кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания МПТ

Поперечная составляющая МДС реакции якоря приводит к искажению, а вследствие насыщения магнитной цепи и к ослаблению магнитного поля главных полюсов.

Продольная составляющая МДС реакции якоря зависит от угла и направления смещения щеток с геометрической нейтрали.

При сдвиге щеток по направлению вращения якоря эта МДС ослабляет магнитный поток главных полюсов у генераторов и усиливает у двигателей.

Реакция добавочных полюсов. При смещении щеток с геометрической нейтрали часть параллельной ветви обмотки якоря, соответствующая двойной дуге этого смещения по окружности якоря, оказывается в зоне действия магнитного потока дополнительного полюса. Это приводит в зависимости от направления смещения щеток к некоторому увеличению или уменьшению ЭДС якоря. Кроме того, под влиянием магнитного поля дополнительного полюса происходит некоторое увеличение насыщения одних участков станины и снижение насыщения других. Однако это влияние добавочных полюсов оказывается незначительным и им обычно пренебрегают.

5.1.2. Учет влияния вихревых токов

Характерной особенностью конструкции МПТ является то, что их магнитопроводы содержат наряду с шихтованными также массивные элементы (станина, иногда добавочные полюса).

Как известно, вокруг катушки, имеющей w витков, по которой протекает электрический ток, создается электромагнитное поле, характеризующееся векторами напряженности (E_1 и H_1). Если по катушке протекает постоянный ток, то и магнитный поток вокруг нее будет постоянным.

При этом для любого замкнутого контура, выделенного в пространстве, окружающем катушку, в соответствии со вторым уравнением Максвелла будем иметь

$$\oint_l E_1\,dl = -\frac{d\Phi}{dt},$$

или для точки

$$\operatorname{rot} E_1 = -\frac{dB}{dt},$$

т. е. если взятый нами замкнутый контур сцеплен с изменяющимся во времени магнитным потоком Φ_1, то скорость его изменения равна линейному интегралу вектора напряженности электрического поля E_1, взятому вдоль этого контура с обратным знаком.

Если взятый нами контур лежит вне источников ЭДС и $\oint_l E_1 dl \neq 0$, то поле, пронизывающее его, является переменным. Если при этом катушка имеет массивный сердечник, то в нем возникает вихревой электрический ток $i_ф$, плотность которого J в пренебрежении то-

ками смещения связана с напряженностью электрического поля в любой точке уравнениями

$$J=\gamma E_1 \text{ или } i_\Phi=\frac{d\Phi}{dt}\gamma,$$

где J — плотность вихревого тока; γ — удельная проводимость материала сердечника.

Эти вихревые токи создают свое магнитное поле, характеризуемое уравнениями

$$\oint_l H_2 dl=I_2;\ \operatorname{rot} H_2=J_2.$$

Так как магнитное поле и напряженность электрического поля катушки являются переменными, то Φ_2 и E_2 поля вихревых токов являются также переменными и, следовательно, в свою очередь наводят свои вихревые токи, для которых справедливы все вышеприведенные рассуждения. Под влиянием полей вихревых токов процессы изменения основного магнитного поля МПТ замедляются.

Сложность процессов и условий, при которых возбуждаются вихревые токи, не позволяет со строгой точностью учесть их влияние на переходные процессы в силовых электрических цепях МПТ. Поэтому при расчетах влиянием вихревых токов или пренебрегают, тем самым заведомо вводя грубые погрешности, или учитывают приближенно.

Существует ряд способов приближенного учета влияния вихревых токов на переходные процессы в МПТ, основными из которых являются следующие:

Увеличение постоянной времени цепи возбуждения. Этот способ был предложен В. Т. Касьяновым на заводе «Электросила» и заключается в том, что в расчет времени возбуждения ЭМ вводится коэффициент демпфирования, увеличивающий время ее возбуждения. Однако таким образом влияние вихревых токов может быть учтено лишь при сугубо ориентировочных расчетах.

Учет влияния вихревых токов эквивалентным короткозамкнутым контуром. Характер протекания переходных процессов в цепях, содержащих массивные элементы магнитопровода, аналогичен характеру протекания их в дросселе с короткозамкнутой вторичной обмоткой. Массивный магнитопровод можно представить как бесконечную сумму контуров вихревых токов, возбуждающихся при пересечении их изменяющимся магнитным потоком.

Основываясь на физическом подобии протекания переходных процессов в указанных цепях, массивный магнитопровод заменяют расслоенным, с некоторой короткозамкнутой эквивалентной обмоткой.

Основная трудность при этом состоит в правильности установления параметров эквивалентной обмотки, определяющих результаты расчетов. Параметры такой эквивалентной обмотки наиболее точно могут быть найдены на основе опытных данных. Расчеты переходных процессов с использованием данного метода, кроме того, отличаются значительной громоздкостью и требуют соблюдения высокой степени точности при вычислениях.

Учет влияния вихревых токов введением в расчеты опытных коэффициентов и выражением магнитной характеристики машины уравнением

$$\Phi=f(i_\mu),$$

где $i_\mu=I_f+\frac{1}{W_f}i_\Phi$ — намагничивающий ток; $i_\Phi=K_\Phi\frac{d\Phi}{dt}$ — вихревой ток; K_Φ — опытный коэффициент; I_f и w_f — соответственно ток и количество витков обмотки возбуждения.

Данным способом, предложенным В. Г. Косаревым (МЭИ), можно воспользоваться, если уже проведены опыты и определен коэффициент K_Φ для данного типа МПТ. А. Б. Иоффе (завод «Динамо») предложил уравнение нарастания магнитного потока в виде

$$\Phi=\Phi_0(1-e^{-t/\tau}),$$

где Φ_0 — установившееся значение магнитного потока; τ — постоянная времени обмотки возбуждения, определяемая с использованием опытного коэффициента.

Учет влияния вихревых токов по методу магнитной индуктивности, предложенному на заводе «Динамо» М. З. Жицем [8; 24]. Сущность этого метода заключается в следующем. Нарастание магнитного потока машины под влиянием внезапно приложенной МДС обмотки возбуждения вследствие влияния вихревых токов происходит замедленно и может быть выражено уравнением

$$\Phi(t)=\Phi_0+\Phi_1(t),$$

где Φ_0 — магнитный поток остаточного намагничивания; $\Phi_1(t)=\frac{F_0}{R_m(t)}$ — магнитный поток, нарастающий под действием МДС обмотки возбуждения (F_0) и вихревых токов; $R_m(t)$ — переходное сопротивление магнитной цепи МПТ. При учете влияния вихревых токов в данном случае принимают во внимание только основную волну вихревых токов, что обеспечивает упрощение задачи и достаточную сходимость результатов расчетов с опытными данными.

Для учета влияния насыщения магнитной цепи характеристика намагничивания МПТ аппроксимируется выпуклой ломаной линией (см. рис. 5.1). Для каждого прямолинейного участка, аппроксимирующего криволинейную характеристику, дифференциальная магнитная проницаемость принимается равной $dB/dH = \text{const}$, следовательно, пропорциональной зависимости между МДС и магнитным потоком, которая меняется при переходе от одного аппроксимированного участка к другому. Одновременно будет также меняться и дифференциальное магнитное сопротивление

$$R_m = \frac{dF}{d\Phi}.$$

Под магнитной индуктивностью L_m (1/Ом) понимается параметр, определяемый геометрическими размерами и электропроводностью массивных частей магнитопровода МПТ, не зависящий от их магнитной проводимости, выражаемый уравнением

$$L_m = \left[\frac{\gamma_j b_j l_j}{16 a_j} + \frac{\gamma_p \pi^2 l_p a_p b_p}{64(a_p + b_p)}\right],$$

где γ_j и γ_p — электропроводность соответственно материала станины и полюса; a_j, b_j, l_j, a_p, b_p, l_p — геометрические размеры соответственно станины и главных полюсов.

Данный метод позволяет вести расчеты переходных процессов МПТ с учетом вихревых токов и насыщения магнитной цепи на основе характеристики намагничивания и конструктивных параметров с обеспечением высокого уровня достоверности полученных результатов.

5.2. Параметры машин постоянного тока

Под параметрами электрической машины понимают группу констант прежде всего активных сопротивлений и индуктивностей, определяющих характер протекания электромагнитных процессов в различных условиях и режимах ее работы. МПТ содержит несколько электрических и магнитных контуров, характеризующихся определенными параметрами. Связь между отдельными контурами и процессы, протекающие в них, зависят от режимов работы машины. Обычно различают параметры для установившихся и переходных режимов при насыщенной и ненасыщенной магнитной системе машины.

Определить раздельно параметры всех контуров в машине не всегда представляется возможным, поэтому часто вводят понятия эквивалентных контуров и соответственно их эквивалентных

параметров. Параметры машин определяют расчетным или опытным путем [3] и выражают в абсолютных или относительных единицах.

Определение индуктивностей обмоток. Индуктивность обмотки возбуждения $L_в$ (Гн) можно определить по формуле

$$L_в = 2p\mu_0 w_в \alpha\tau l_п/\delta, \tag{5.1}$$

где $w_в$ — количество витков на полюс; $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ Гн/см, $\alpha = 0{,}65 \div 0{,}75$ — коэффициент полюсной дуги; τ — полюсное деление, см; $l_п$ — длина сердечника полюса; δ — воздушный зазор, см.

Индуктивность цепи якоря МПТ (L_a) (Гн) определяется различными потоками, создаваемыми током якоря в отдельных элементах этой цепи

$$L_a = L_R + L_s + L_д + M_{дa}. \tag{5.2}$$

Индуктивность от основного потока реакции якоря (Гн)

$$L_R = 20{,}6N^2\alpha^3 D_a l_a \cdot 10^{-11}/(a^2 p^2 \delta').$$

Индуктивность от потоков рассеяния в пазах и лобовых частях обмотки якоря (Гн)

$$L_s = \frac{N^2 \lambda l_a \cdot 10^{-8}}{4a^2 Z}.$$

Индуктивность обмотки дополнительных полюсов (Гн)

$$L_д = 2pw_д[1 + \gamma_s(\sigma_д - 1)]\Phi_д \cdot 10^{-8}/3I_a.$$

Взаимная индуктивность между обмотками якоря и добавочных полюсов (Гн)

$$M_{дa} = -\frac{1}{3}\frac{N\Phi_д \cdot 10^{-8}}{I_a}.$$

Общая индуктивность обмотки якоря (Гн) МПТ малой мощности (без добавочных полюсов)

$$L_a = 22\frac{\alpha^3 N_2^2 l_a D_a \cdot 10^{-11}}{a^2 p^2 \delta}, \tag{5.2}$$

где l_a, D_a — длина и диаметр сердечника якоря, см; a — количество пар параллельных ветвей обмотки якоря; p — количество пар полюсов; N_2 — количество проводников обмотки якоря; $\delta' = K_\delta \delta$ — расчетная длина воздушного зазора, см; $K_\delta = 1{,}05 \div 1{,}1$ — для

полузакрытых пазов якоря; $K_\delta=1,2\div1,3$ — для открытых пазов якоря; $\gamma_s=0,7\div0,8$ — коэффициент сцепления потока рассеяния с обмоткой добавочного полюса; $\Phi_д$ — полезный магнитный поток добавочного полюса.

Индуктивность цепи якоря (Гн) может быть также определена приближенно по формуле

$$L_a=A\frac{U_н}{I_я 2\pi p n}, \tag{5.3}$$

где $A=0,6$ — для некомпенсированных МПТ и $A=0,15$ — для компенсированных МПТ; в относительных единицах $A=X_q=0,15\div0,6$; n — частота вращения якоря, об/с.

Индуктивность рассеяния обмотки якоря (о.е.)

$$X_{sa}\simeq X'_q=\sigma_s X_q,$$

здесь $\sigma_s\simeq0,3$ — коэффициент рассеяния обмотки якоря.

5.3. Процесс возбуждения машины постоянного тока

Пусть якорь МПТ с параллельным возбуждением вращается с частотой $n=\text{const}$, нагрузка отключена. При этом в обмотке якоря генератора будет индуктироваться ЭДС $E_{ост}$, обусловленная остаточным магнитным потоком $\Phi_{ост}$.

При подключении цепи возбуждения с параметрами $L_в$ и $R_в$ к зажимам якоря по обмотке возбуждения под действием ЭДС $E_{ост}$ потечет ток возбуждения $i_в$, который создаст дополнительный магнитный поток Φ. ЭДС и напряжение генератора увеличится, что приведет к дальнейшему увеличению тока возбуждения и магнитного потока и так далее. Процесс изменения напряжения U генератора будет выражаться уравнением

$$U=i_в R_в+\frac{d(L_в i_в)}{dt}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения (Гн) определяется по (5.1), или приближенно ее можно определить по формуле

$$L_в=2pw_в\frac{\Phi_{нп}}{i_{вн}}, \tag{5.4}$$

здесь $2p$ — число полюсов; $w_в$ — число витков обмотки возбуждения; $\Phi_{нп}$ — номинальный магнитный поток в сердечнике полюса, Вб; $i_{вн}$ — номинальный ток возбуждения, А.

Следует иметь в виду, что

$$\Phi_{\text{нш}} = \Phi_{\text{н}}\sigma,$$

где σ — коэффициент рассеяния полюсов.

При $R_{\text{в}} = \text{const}$ падение напряжения $i_{\text{в}}R_{\text{в}}$ будет изменяться пропорционально току $i_{\text{в}}$. Графически оно будет выражаться прямой, проведенной под углом α (рис. 5.2), причем $\operatorname{tg}\alpha \approx i_{\text{в}}R_{\text{в}}/i_{\text{в}} = R_{\text{в}}$.

Разность ординат между кривыми E и U равна $\Delta E = U - i_{\text{в}}R_{\text{в}} = \dfrac{d(L_{\text{в}}i_{\text{в}})}{dt}$. Она служит мерой интенсивности происходящего процесса самовозбуждения генератора. Очевидно, что процесс заканчивается, когда $\Delta E = U - i_{\text{в}}R_{\text{в}} = 0$, т. е. когда графики пересекаются в точке A. При этом $i_{\text{в}m} = U/R_{\text{в}}$.

В то же время напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и обмотки возбуждения для каждого момента времени при $n = \text{const}$ пропорционально магнитному потоку Φ. Следовательно, можно принять

$$\Delta E = w\frac{\Phi}{U}\frac{dE}{dt} = \tau\frac{dE}{dt},$$

где $\tau = w\dfrac{\Phi}{U} = \dfrac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}$ — постоянная времени цепи возбуждения.

С увеличением $R_{\text{в}}$ будет увеличиваться угол α, и точка A будет скользить по характеристике холостого хода. При $R_{\text{в}} \div R_{\text{вкр}}$ прямая $U = f(i_{\text{в}})$ пойдет по касательной кривой х.х., самовозбуждение генератора окажется невозможным.

Таким образом, **для самовозбуждения генератора необходимы следующие условия**: наличие магнитного потока остаточной намагниченности; согласное включение обмотки возбуждения с потоком остаточной намагниченности так, чтобы $\Phi = \Phi_{\text{ост}} + \Phi_{\text{в}}$, сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического $R_{\text{вкр}}$, при котором прямая $i_{\text{в}}R_{\text{в}}$ пересекает характеристику х.х.

Количественная оценка процесса самовозбуждения генератора может быть выполнена на основе следующих положений [22].

Ток в обмотке возбуждения в процессе самовозбуждения определяется уравнением

$$i_{\text{в}} = [E - w_{\text{в}}(d\Phi/dt)]/R_{\text{в}},$$

где $w_{\text{в}}(d\Phi/dt)$ — ЭДС, наводимая

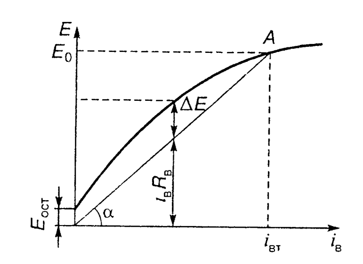


Рис. 5 2. Характеристика х.х. МПТ

в обмотке возбуждения изменяющимся магнитным потоком; $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения.

Начальное значение тока $i_в$ определяется остаточной ЭДС $E_{ост}$. Из рис. 5.2 можно найти $\Delta E = w_в (d\Phi/dt) = E - i_в R_в$. Напряжение на зажимах обмотки возбуждения

$$\Phi/\Phi_у = E/E_у \text{ и } d\Phi/dt = (\Phi_у/E_у)\cdot(dE/dt),$$

где $\Phi_у$ и $E_у$ — магнитный поток и ЭДС в установившемся режиме.

Полагая, что $w_в \Phi_у/E_у = \tau$, получим $\Delta E = \tau(dE/dt)$.

При известной величине $\Delta E = f(E)$ из рис. 5.2 уравнение $t = \tau \int\limits_{E_{ост}}^{E} dE/\Delta E$ можно решить графически или приближенно аналитически; если ΔE представить в виде параболы при $t=0$, $E=E_{ост}$ и $t=\infty$; $E=1$, тогда

$$\Delta E \approx 4E(1-E)\Delta E_{max},$$

здесь E и ΔE выражены в относительных единицах $E = E_в/E_{ув}$; при $E=1$, $\Delta E=0$; при $E=E_{ост}$ можно принять $\Delta E \approx E_{ост}$, тогда процесс самовозбуждения приближенно будет выражаться уравнениями

$$t = [\tau/(4\Delta E_{max})]\ln[(E/E_{ост})(1-E_{ост})/(1-E)]; \quad (5.5)$$

$$E = E_{ост}\,e^{4\Delta E_{max} t/\tau_в}/(1 - E_{ост} + E_{ост}\,e^{4\Delta E_{max}\cdot t/\tau_в}). \quad (5.6)$$

Значение E изменяется от $E_{ост}$ до 1; при $t=\infty$ $E=1$; при $t=0$ $E=E_{ост}$.

При подключении обмотки возбуждения МПТ с активным сопротивлением $R_в$ и индуктивностью $L_в$ к независимому источнику постоянного тока с напряжением $U_в$ нарастание тока в обмотке будет протекать подобно тому, как это было установлено в § 4.3, рис. 4.2.

В произвольный момент времени t ток в цепи обмотки возбуждения $i_в$ будет определяться алгебраической суммой приложенного к цепи напряжения $U_в$ и возникающей в ней ЭДС самоиндукции $E_в = -L_в \frac{di_в}{dt}$, т. е.

$$i_в = \frac{U_в - E_в}{R_в} = \frac{U_в - L_в \frac{di_в}{dt}}{R_в}.$$

Следовательно,

$$\frac{di_в}{dt}=\frac{U_в-i_вR_в}{L_в}.$$

Решая это уравнение относительно тока $i_в$, получим

$$i_в=\frac{U_в}{R_в}-\frac{U_в}{R_в}\mathrm{e}^{-t/\tau}=i'_в+i''_в.$$

Первый член этого уравнения $i'_в=U_в/R_в$ представляет собой вынужденную составляющую (установившийся ток цепи), а второй $i''_в=(U_в/R_в)\mathrm{e}^{-t/\tau}$ — свободную апериодическую составляющую тока. Здесь постоянная времени $\tau=L_в/R_в$ представляет собой параметр, включающий собственно индуктивность обмотки возбуждения и составляющую, обусловленную демпфирующим действием вихревых токов, возникающих в массивных элементах магнитопровода в процессе нарастания магнитного потока. При значительной индуктивности параллельной обмотки возбуждения влиянием вихревых токов в ряде случаев можно пренебречь.

Пример. Дан генератор постоянного тока с параллельным возбуждением. Мощность 25 кВт; $I_н=130$ А; $U_н=220$ В; $n=1500$ об/мин; $R_a=0{,}0686$ Ом; $w_a=81$ вит.; $w_в=1100$ вит.; $R_в=87{,}3$ Ом; $w_д=26$ вит.; $R_д=0{,}0255$ Ом; $i_{вн}=1{,}84$ А; $E_{ост}=0{,}05$ о.е.; $\Delta E_m=2{,}5E_{ост}$; $2p=4$; $\sigma=1{,}1$; $L_a=1{,}6$ мГн; $L_в=32{,}5$ Гн; $J=0{,}4$ кг·м², $\eta=0{,}855$; $\Phi=1{,}24\cdot10^{-2}$ Вб.

Требуется рассчитать и построить график нарастания ЭДС в обмотке якоря в процессе самовозбуждения генератора, рассчитать и построить график изменения тока якоря при внезапном к.з. генератора, вычислить максимальное значение тока якоря при безреостатном пуске двигателя с параллельным возбуждением, промежуток времени, через который после включения ток якоря достигает максимального значения и определить установившееся значение тока якоря на холостом ходу.

Процесс нарастания ЭДС генератора при самовозбуждении. Индуктивность обмотки возбуждения (5.4)

$$L_в=2pw_в\frac{\Phi_{нп}}{i_{вн}}=2\cdot2\cdot1100\frac{1{,}36\cdot10^{-2}}{1{,}84}=32{,}5\ Гн.$$

$$\Phi_{нп}=\Phi_н\sigma=1{,}24\cdot10^{-2}\cdot1{,}1=1{,}36\cdot10^{-2}\ Вб.$$

Постоянная времени обмотки возбуждения

$$\tau_в=\frac{L_в}{R_в}=32{,}5/87{,}3=0{,}32\ с.$$

Процесс нарастания ЭДС генератора определяется уравнением (5.6)

$$E=\frac{E_{ост}\cdot\mathrm{e}^{4\Delta E_m t/\tau_в}}{1-E_{ост}+E_{ост}\ \mathrm{e}^{4\Delta E_m t/\tau_в}}=\frac{0{,}05\ \mathrm{e}^{4\ 2{,}5\ 0{,}05\ t/0{,}32}}{1-0{,}05+0{,}05\ \mathrm{e}^{4\ 2{,}5\ 0{,}05\ t/0{,}32}}=\frac{0{,}05\mathrm{e}^{1{,}56t}}{0{,}95+0{,}65\mathrm{e}^{1{,}56t}}.$$

Для решения этого уравнения с использованием калькулятора МК61 составляем программу.

Программа вычислений

$t/\tau_в$		
00	П→хв	ΔE_m
01	X	$\Delta E_m \cdot t/\tau_в$
02 03	4 X	$4\Delta E_m \cdot t/\tau_в$
04	Fe^x	$e^{4\Delta E_m} \cdot t/\tau_в$
05	П→ха	$E_{ост}$
06 07	X х→ПО	$E_{ост}\, e^{4\Delta E_m\ t/\tau_в}$
08	1	$1-E_{ост}+E_{ост}\, e^{4\Delta E_m \cdot t/\tau_в}$
09 10 11 12	П→ха — П→хо +	
13 14 15 16	÷ С/П БП 00	 Индик. E Задаем новое значение $t/\tau_в$ и переходим к началу программы

Данные по регистрам:
$E_{ост} \to a$
$\Delta E_m \to в$

Работа с программой:
в/о $F_{прг}$ программа $F_{авт}$ в/о
ввод данных:
$E_{ост}$ $x \to$Па
ΔE_m $x \to$Пв
счет $t/\tau_в$ С/П $\xrightarrow{инд.}$ E

Задаваясь значениями времени t, выраженными в долях $\tau_в$ от $t=0$ до $t=10\tau_в$ с интервалом $0{,}5\tau_в$, находим соответствующие значения ЭДС; $\Delta E_m=0{,}125$. Результаты вычислений сведены в табл. 5.2.

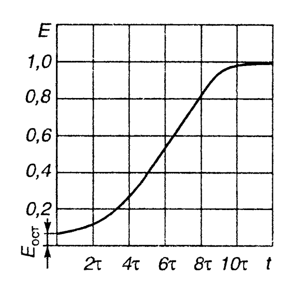


Рис. 5.3. Процесс самовозбуждения генератора постоянного тока (к примеру расчета)

Таблица 5.2

t	0	$0,5\tau_в$	$\tau_в$	$1,5\tau_в$	$2\tau_в$	$2,5\tau_в$	$3\tau_в$	$3,5\tau_в$	$4\tau_в$	$4,5\tau_в$	$5\tau_в$
E, о.е.	0,05	0,063	0,081	0,1	0,125	0,155	0,19	0,23	0,28	0,33	0,39
t	$5,5\tau_в$	$6\tau_в$	$6,5\tau_в$	$7\tau_в$	$7,5\tau_в$	$8\tau_в$	$8,5\tau_в$	$9\tau_в$	$9,5\tau_в$	$10\tau_в$	
E, о.е.	0,45	0,51	0,56	0,63	0,69	0,74	0,78	0,82	0,86	0,88	

По полученным данным строим график $E=f(t)$ (рис. 5.3).

5.4. Внезапное короткое замыкание генератора постоянного тока

При внезапном к.з. генератора постоянного тока (ГПТ) протекают сложные переходные процессы, связанные с такими факторами, как коммутация, нелинейность магнитной характеристики, вихревые токи в массивных частях магнитопровода, падение напряжения в щеточном контакте, сложные магнитные связи обмоток. Режим к.з. ГПТ представляет большую опасность не только по условиям тепловых и механических нагрузок, но и в связи с возможностью возникновения кругового огня на коллекторе.

Для определения величин и характера изменения токов, напряжений и частоты вращения МПТ в переходных режимах составляют дифференциальные уравнения. От того, насколько полно и правильно учтены в этих уравнениях факторы, влияющие на протекание переходных процессов, будет зависеть сложность решения поставленных задач и уровень достоверности полученных результатов.

Методику составления системы дифференциальных уравнений МПТ рассмотрим на примере 4-полюсной машины со смешанным возбуждением.

Такая машина имеет два контура: контур обмотки возбуждения и контур силовой цепи якоря с последовательно соединенными обмотками якоря, добавочных полюсов и последовательной обмотки возбуждения. С учетом насыщения магнитной цепи путем линейно-кусочной аппроксимации магнитной характеристики машины и влияния вихревых токов по методу магнитной индуктивности [8, 24] система дифференциальных уравнений имеет вид:

уравнение равновесия напряжений силовой цепи

$$U_a = i_a R_a + cn\Phi + L_a \frac{di_a}{dt} + 4w_с \frac{d\Phi}{dt} + 4w_с L_к \left(w_с \frac{di_a}{dt} + W_ш \frac{di_ш}{dt} \right);$$

уравнение равновесия напряжений цепи возбуждения

$$U_ш = i_ш R_ш + 4w_ш \frac{d\Phi}{dt} + 4w_ш^2 L_к \frac{di_ш}{dt} + 4w_ш w_с L_к \frac{di_a}{dt};$$

уравнение равновесия для магнитной цепи

$$w_ш i_ш + w_c i_a = F_0 + (\Phi - \Phi_0)R_m + L_m \frac{d\Phi}{dt};$$

уравнение равновесия моментов

$$K\Phi i_a = J\frac{d\omega}{dt} + M_c.$$

На основании этой системы уравнений можно получить достаточно достоверные данные о характере переходных процессов, но ее решение сопряжено с большими трудностями.

Для большей наглядности рассмотрим упрощенную картину внезапного к.з. ГПТ [22].

Теоретическую величину установившегося тока к.з. при возбуждении, равном номинальному, можно определить по характеристике намагничивания и характеристическому треугольнику (рис. 5.4).

Установившийся ток к.з. генератора с независимым возбуждением (рис. 5.4, *б*)

$$I_{ку} = I_н a'c'/(ac).$$

Величина тока $I_{ку}$ определяется активным сопротивлением якоря, его продольной реакцией, размагничивающим действием поперечной реакции и коммутационной реакцией. Для генератора с параллельным возбуждением $I_{ку}$ определяется остаточной намагниченностью и поэтому имеет малую величину (рис. 5.4, *а*):

$I_{ку} = E_{ост}/R_a$, а максимальный ток к.з. $I_{кm} = I_{ан} a''c''/ac$.

Однако в этих случаях не учитываются многие факторы и прежде всего размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения под щетками, которое изменяется по закону

$$\Delta U_щ = \Delta U_{щ0} + a_щ i^*,$$

здесь $\Delta U_{щ0} \approx 2B/U_н$; $a_щ = 0{,}4B/U_н$; $i_* = i/I_н$, о.е.; относительная величина размагничивающей МДС поперечной реакции якоря по отношению к полной номинальной МДС якоря $F_q = W_a I_н$, $F_{\rho q} = K_{\rho q} i$, о.е.

При ненасыщенной магнитной системе машины $F_{\rho q} \approx 0$.

Для некомпенсированных насыщенных машин и больших кратностях тока коэффициент $K_{\rho q} = 0{,}05 \div 0{,}1$; для компенсированных машин $K_{\rho q} \approx 0$.

Коммутационная реакция якоря (о.е.) в узких пределах изменения тока $F_k = C_k i$, где $C_k = 0{,}1 \div 0{,}2$. При больших пределах изменения тока $F_k = C_k i^2$.

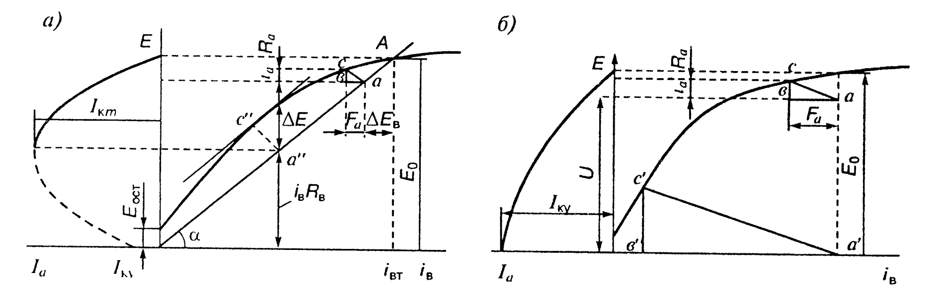


Рис. 5.4. Характеристика холостого хода генератора:

а — с параллельным возбуждением; *б* — с независимым возбуждением

Продольная реакция якоря (о.е.) при установке щеток на геометрической нейтрали в МПТ с добавочными полюсами $F_d \simeq 0{,}02i$.

Полная реакция якоря $F_r \approx (K_{pq} + C_k + C_d)i = K_r i$. ЭДС в обмотке якоря от полной размагничивающей реакции $\Delta E_2 \approx K_r \omega_0 i$. В этом случае установившийся ток к.з. генератора с независимым возбуждением определится уравнением

$$E_0 - (\Delta U_{щ0} + a_{щ} i) - K_r \omega_0 i = i r_\sigma, \tag{5.5}$$

где ω_0 — механическая угловая частота при $t=0$, о.е.; r_σ — суммарное сопротивление якорной цепи, о.е. Из этого уравнения

$$i_{ку} = (E_0 - \Delta U_{щ0})/(r_\sigma + a_{щ} + K_r \omega_0). \tag{5.6}$$

Если принять $E_0 = 1$; $\Delta U_{щ} = 0{,}01$ о.е.; $r_\sigma = 0{,}1$ о.е.; $a_{щ} \approx 0{,}02$; $\omega_0 = 1$; $K_r = 0{,}2$, то

$$i_{ку} = (1 - 0{,}01)/(0{,}1 + 0{,}02 + 0{,}2) = 3{,}1 \text{ о.е.}$$

При внезапном к.з. в первый момент возникает пик тока якоря, затухающий затем относительно медленно (рис. 5.5).

ЭДС вращения якоря уравновешивается падениями напряжения в активных сопротивлениях цепи якоря и ЭДС само- и взаимоиндукции.

Обмотки якоря, добавочных полюсов и компенсационная расположены по поперечной оси; обмотка возбуждения, последовательная обмотка, продольная МДС и короткозамкнутые секции якоря — в продольной оси. В связи с искажением поля и размагничивающим действием поперечной реакции якоря существует взаимоиндукция между обмотками, расположенными по осям d и q.

При этом в относительных единицах можно принять $M_{qв} = m_r = K_r \lambda$. В этом случае

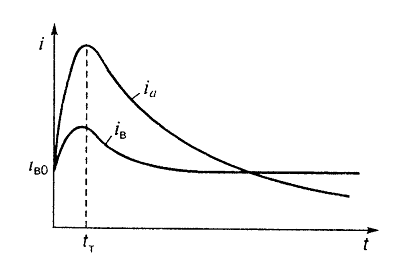


Рис. 5.5. Токи якоря и возбуждения генератора постоянного тока при коротком замыкании

$$E'_a = i_a r_\sigma + L_\sigma \frac{di_a}{dt} + $$
$$+ M_{qв} \frac{di_в}{dt} (M_a - M_к - M_д) \frac{di_a}{dt};$$

или, вводя $L_q = L_\sigma + M_a - (M_к + M_д)$, получим

$$E'_a = i_a r_\sigma + L_q (di_a/dt) + M_{qв} (di_в/dt).$$

ЭДС вращения

$$E'_a = E_q = \omega_0 \psi_d; \ \psi_d = M_в i_в \pm M_с i_a - M_{qв} i_a - L_d i_d.$$

Уравнение для цепи возбуждения:

$$i_в r_в + L_в (di_в/dt) + M_{qв} (di_a/dt) = U_в;$$

$$\Delta i_в r_в + L_в (d\Delta i_в/dt) + M_{qв} (di_a/dt) = 0;$$

$$i_в = i_{в0} + \Delta i_в,$$

где $i_{в0}$ — ток возбуждения перед к.з.; $\Delta i_в$ — наведенный ток возбуждения; $L_d i_d$ — потокосцепление в продольной оси обмотки якоря от тока в короткозамкнутых секциях; $i_в$ — ток возбуждения, приведенный к току якоря; $M_в$ — взаимоиндуктивность обмоток возбуждения и якоря при условном совмещении осей; $M_в i_в$ — поток от тока возбуждения, входящий в якорь; $M_с i_a$ — поток от последовательной обмотки.

В результате решения этой системы уравнений ток якоря в функции времени представляется выражением

$$i_a \approx I_{aу} - I'_{max} e^{-t/\tau_a} + (I'_{max} - I_{aу}) e^{-t/\tau_в}; \quad (5.7)$$

здесь

$$I'_{max} \simeq I_{max} = E'_0 / [r_\sigma + M_{qв} \omega_0 (1 - 1/\sigma_в)];$$

$$E'_0 = E_0 - \Delta U_{щ0}; \quad (5.8)$$

$$I_{aу} = E'_0 / (r_\sigma + \omega_0 M'_{qв}). \quad (5.9)$$

Это выражение в о.е. эквивалентно (5.6). При переходе к относительным единицам используют равенства

$$r_{\sigma*} = r_\sigma I_{aн} / U_н; \ \omega m'_{qв} = \omega M'_{qв} I_н / U_н \approx \omega m_r;$$

$$\omega_0 m_в = \omega M'_в I_{aн} / U_н; \ M'_в = M_в (w_a / w_в).$$

Относительная величина r_σ численно равна отношению потерь в обмотках при номинальном токе $I_н^2 r_\sigma$ к номинальной (базисной) мощности ЭМ. С ростом мощности машины r_σ (о.е.) уменьшается примерно пропорционально $\sqrt[4]{P_н}$. Так, для ЭМ мощностью 10 кВт $r_\sigma \simeq 0{,}1$, т. е. потери в меди равны 10% от $P_н$, а для машины 1000 кВт $r_\sigma = 0{,}04$. Если бы пик тока I_{max} определялся активным сопротивлением, то в первом случае получили бы $I_{am} \approx 10 I_н$, а во втором $I_{am} = 1/0{,}04 = 25 I_н$. В действительности в обоих случаях $I_m \approx (7 \div 8) I_н$. Так, например, при $r_\sigma = 0{,}01 (1\%)$: $\omega m_{qв} = 0{,}3$; $\sigma_в = 1{,}45$; $E_0 = 1$; $\Delta U_щ = 0{,}05$.

$$I_m = (1 - 0{,}05)/[0{,}01 + 0{,}3\,(1 - 1/1{,}45)] = 9 \text{ о.е.};$$

$$I_{ay} = (1 - 0{,}05) \cdot (0{,}01 + 0{,}3) = 3{,}07 \text{ о.е.}$$

При этом также следует иметь в виду, что при внезапном к.з. размагничивающее действие реакции якоря и соответствующее снижение полезного потока, увеличение рассеяния главных полюсов приводят к снижению ЭДС, действующей в момент к.з., и, следовательно, тока короткого замыкания на $30 \div 50\%$.

Расчет тока якоря генератора с параллельным возбуждением при внезапном к.з. можно выполнить по приближенной формуле

$$i_a = \frac{U_н}{L_a\left(\dfrac{1}{\tau_a} - \dfrac{1}{\tau_в}\right)}\left(e^{-t/\tau_в} - e^{-t/\tau_a}\right). \tag{5.7}$$

Процесс внезапного к.з. генератора с параллельным возбуждением (5.7) можно разделить на два этапа:

а) период быстрого нарастания тока якоря $di/dt = 1000 I_н/с$, $I_{max} = (7 \div 15) I_н$;

б) медленный спад тока до $I_{ку} = (1 - 3) I_н$.

Если принять поток рассеяния равным ~ 15% от полезного потока МПТ, то общий поток главных полюсов до к.з. равен 115%. При внезапном к.з. и 3-кратном всплеске тока возбуждения поток рассеяния возрастает до 45%. По закону постоянства потокосцеплений полезный поток полюсов в момент максимума тока возбуждения в этом случае будет равен $115 - 45 = 70\%$ и соответственно ЭДС МПТ в момент всплеска тока упадет до 70% от первоначальной величины, т. е. при к.з. действует не только реакция якоря, снижающая кратность пускового тока, но и рассеяние полюсов. Имеет значение также переходное сопротивление щеточного контакта.

Пример. Рассчитать и построить график изменения тока короткого замыкания генератора с параллельным возбуждением, данные которого приведены в предыдущем примере. Для расчета тока к з. воспользуемся формулой (5.7)

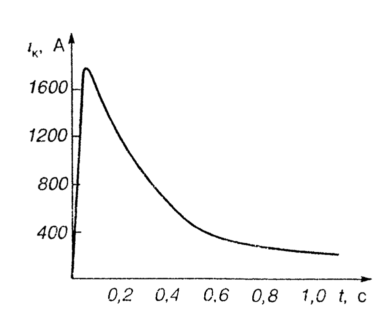


Рис. 5.6. График тока короткого замыкания генератора постоянного тока (к примеру расчета)

$$i_a=\frac{U_н}{L_a\left(\frac{1}{\tau_a}-\frac{1}{\tau_в}\right)}\left(e^{-t/\tau_в}-e^{-t/\tau_a}\right)=$$

$$=\frac{220}{3{,}25\cdot 10^{-3}\left(\frac{1}{0{,}0345}-\frac{1}{0{,}32}\right)}\times$$

$$\times\left(e^{-t/0{,}32}-e^{-t/0{,}0345}\right).$$

Индуктивность цепи якоря (5.3)

$$L_a=\frac{A\cdot U_н}{I_н\cdot 2\pi\cdot p\cdot n_н}=\frac{0{,}6\cdot 220}{130\cdot 2\pi\cdot 2\cdot 25}=$$

$$=3{,}25\cdot 10^{-3}\ Гн.$$

Постоянные времени обмоток якоря и возбуждения

$$\tau_a=L_a/R_a=3{,}25\cdot 10^{-3}/(0{,}0686+0{,}0255)=0{,}0345\ с;\ \tau_в=0{,}32\ с.$$

По результатам вычислений, сведенным в табл. 5.2, построен график $i_к=f(t)$ (рис. 5.6).

Таблица 5.2

t, с	0	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5	1
$i_к$, А	0	61	281	520	1460	1594	494	235

Установившийся ток короткого замыкания будет определяться остаточной ЭДС и сопротивлением цепи якоря

$$I_{ку}\approx E_{ост}/R_a=0{,}05\cdot 220/(0{,}0686+0{,}0255)=117\ А.$$

5.5. Прямой пуск двигателя с параллельным возбуждением

Процессы пуска, торможения, реверса и регулирования частоты вращения являются важнейшими режимами работы двигателей постоянного тока (ДПТ) в системах современного электрического привода.

При пуске после подачи напряжения в ДПТ возникают два взаимосвязанных, налагающихся друг на друга переходных процесса — электромагнитный переходный процесс в цепях якоря и возбуждения и механический процесс разгона якоря.

В связи с индуктивностью электрических цепей и нарастанием противо-ЭДС в якоре в процессе его разгона токи в этих цепях достигают установившихся значений лишь через некоторое время. Продолжительность разгона якоря определяется маховым и враща-

ющим моментами. При достижении равенства вращающего момента и момента сопротивления наступает установившийся режим вращения.

Если положить, что обмотка возбуждения включена предварительно и нагрузка на валу ДПТ отсутствует, то при подаче напряжения на щетки переходные процессы с некоторым приближением могут быть описаны уравнениями [15]

$$U = E_a + i_a r_a + L_a \frac{di_a}{dt}; \tag{5.10}$$

$$M_э = J \frac{d\omega}{dt} = \psi_{d0} i_a, \tag{5.11}$$

где J — сумма моментов инерции якоря и связанных с ним вращающихся частей; $E_a = cn\Phi$, $M_э = \frac{E_a i_a}{\omega}$, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$; $\tau_м = \frac{J\omega_0}{M_н}$ — механическая постоянная времени — для ДПТ мощностью до 10 кВт $\tau_м = 0{,}2 \div 0{,}4$ с.

Решая уравнение (5.10) относительно i_a, получим

$$i_a = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где P_1 и P_2 — корни характеристического уравнения $P_{1,2} = -\delta \pm \pm\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$, здесь $\delta = R_a/(2L_a)$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_э L_a}}$; $C_э = \frac{J}{\psi_{d0}^2}$ — эквивалентная динамическая емкость якоря.

Если $\delta \geqslant \omega_0$, то уравнение для тока якоря будет иметь вид

$$i_a = (A_1 + A_2 t)\, e^{-pt};$$

если $\delta < \omega_0$, то

$$i_a = (A_1 \cos\beta t + A_2 \sin\beta t)\, e^{-\delta t},$$

где $\beta = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$.

Постоянные интегрирования определяют из начальных условий при $t = 0$, $i_a = 0$, $\omega_0 = 0$.

Если $\delta > \omega_0$, то $A_2 = -A_1$; $\frac{di_a}{dt} = A_1 (p_1 + p_2)$; $U = L_a \frac{di_a}{dt}$, тогда

$$i_a = A_1 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \; A_1 = \frac{U}{L_a (p_1 - p_2)}.$$

И в результате получим уравнение изменения тока при прямом пуске двигателя

$$i_a = \frac{U\left(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}\right)}{L_a (p_1 - p_2)}.$$

Изменение частоты вращения якоря при пуске определится уравнением

$$\omega = \frac{\psi_{d0}}{J} \int_0^t i_a dt,$$

после преобразований которого получим

$$\omega = \frac{\psi_{d0}}{J} \cdot \frac{U}{L_a} \frac{P_1\left(1 - e^{-p_2 t}\right) - P_2\left(1 - e^{-p_1 t}\right)}{P_1 P_2 (P_1 - P_2)}.$$

При $t = 0$, очевидно, $\omega = 0$.

В уставновившемся режиме при $t = \infty$, поскольку $P_1 P_2 = \omega_0^2 = \frac{1}{C_э L_a} = \frac{\psi_{d0}^2}{J L_a}$, получим $\omega = U/\psi_{d0}$, а это частота идеального х.х.

Графики токов якоря и возбуждения и частоты вращения при прямом пуске представлены на рис. 5.7.

При прямом пуске ток сначала резко возрастает, достигает максимума, а затем снижается до установившегося значения апериодически, но возможен и колебательный процесс. Возникновение колебательного процесса является нежелательным, и для его исключения потребуется или увеличение момента инерции якоря, или уменьшение магнитного потока главных полюсов.

Энергия, выделяемая в ДПТ при прямом пуске, равна кинетической энергии якоря $Q_a \simeq 0{,}5\omega_0^2 J$.

Таким образом, прямой пуск ДПТ сопряжен с возникновением больших всплесков тока якоря и нарушением коммутационной устойчивости, поэтому допускается только для машин небольшой мощности и без нагрузки, во избежание выхода их из строя.

Пример. Вычислить максимальное значение тока якоря при безреостатном пуске двигателя с параллельным возбуждением, промежуток времени, через который после выключения ток якоря достигает максимального значения, и определить установившееся значение тока якоря на холостом ходу. Данные двигателя примем теми же, что и для генератора в предыдущих примерах.

Максимальное значение тока якоря при прямом пуске

$$I_m \approx I_к \left(\frac{\tau_м}{\tau_в}\right)^{\tau_в/(\tau_в - \tau_м)} = 2350 \left(\frac{0{,}62}{0{,}32}\right)^{0{,}32/(0{,}32 - 0{,}62)} = 1162 \text{ А},$$

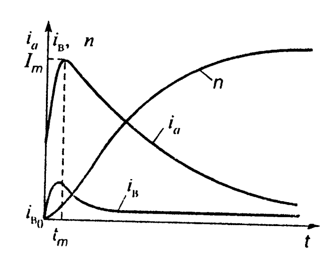


Рис. 5.7. Графики частоты вращения, токов якоря и возбуждения при прямом пуске ДПТ

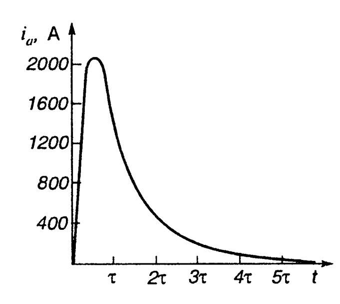


Рис. 5.8. График тока якоря при прямом пуске двигателя постоянного тока

т. е. кратность пускового тока $I_m/I_н=1162/130=8{,}9$. Электромеханическая постоянная времени

$$\tau_m=\frac{J\omega\cdot10^{-4}}{c\Phi_\delta I_н}\approx\frac{J\omega\cdot10^{-2}}{М_{пm}}=\frac{0{,}4\cdot314\cdot10^{-2}}{2{,}0}=0{,}62\ \text{с}.$$

$$\omega=2\pi n/60=2\pi\cdot1500/60=314\ \text{рад/с};\ I_к=\frac{U}{R_a}=220/0{,}0941=2350\ \text{А},$$

где $М_{пm}$ — кратность максимального пускового момента.

Промежуток времени, через который ток якоря достигнет максимального значения,

$$t_m=\frac{\tau_в\tau_м}{\tau_м-\tau_в}\ln\frac{\tau_в}{\tau_м}=\frac{0{,}32\cdot0{,}62}{0{,}62-0{,}32}\ln\frac{0{,}32}{0{,}62}=0{,}139\ \text{с}.$$

График пускового тока $i_п=f(t)$ представлен на рис. 5.8.

Установившееся значение тока якоря на х.х. $I_{ух.х}$ может быть определено из равенств

$$I_{ух.х}=(U-E)/R_a,\ E=cn\Phi,\ c=pn/60,$$

или приближенно из имеющихся данных.

Так, потери в ДПТ $P_{пот}=P_н(1-\eta)=25(1-0{,}855)\cdot1000=3625$ Вт. Этим потерям соответствует ток $I_{пот}=P_{пот}/U_н=3625/220=16{,}47$ А.

Потери, обусловленные разностью токов $I_н-I_{пот}$ в меди якорной цепи $P_{мa}=(I_н-I_{пот})^2$. Им соответствует ток $I_{мa}=P_{мa}/U_н=1213/220=5{,}51$ А.

Тогда можно принять

$$I_{ух.х}\approx I_{пот}-I_{мa}=1647-5{,}51=10{,}96\ \text{А}.$$

5.6. Восстановление напряжения на двигателе после кратковременного отключения

Кратковременный перерыв питания ДПТ часто случается в эксплуатации, например, при срабатывании устройств автоматического повторного включения (АПВ), при переключениях на резервные источники питания, на электротранспорте при кратковременных отрывах токоприемника от контактного провода и т. п.

В таких случаях ток двигателя и частота вращения якоря быстро уменьшаются, магнитный поток так же быстро уменьшается, поддерживаемый лишь вихревыми токами, возникающими в массивных частях магнитопровода ЭМ.

При последующем восстановлении напряжения ток быстро нарастает.

Условия коммутации ЭМ при этом значительно ухудшаются как вследствие нарастания тока в двигателе и соответственно реактивной ЭДС, так и вследствие резкого искажения формы кривой магнитной индукции под главными полюсами, а также из-за отставания индукции под добавочным полюсом от коммутируемого тока якоря под действием вихревых токов в массивных частях магнитопровода, по которым проходит коммутирующий поток добавочного полюса.

Используя метод кусочно-линейной аппроксимации магнитной характеристики, система дифференциальных уравнений, описывающих протекание переходного процесса на участке магнитной характеристики с дифференциальным магнитным сопротивлением R_1, $R_2...R_k$ для двигателя с последовательным возбуждением при $n \neq 0$ будет иметь вид

$$U = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + cn\Phi + w\frac{d\Phi}{dt};$$

$$-w_1 i + \Phi(R_k - R_1) + c_1 R_1(\Phi - \Phi_1) + c_2 L_\mu \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} = \sum_{n=1}^{k-1} \Phi_0 (R_{n+1} - R_n);$$

$$-w_1 i + \Phi(R_k - R_1) + c_3 R_1 \Phi_1 + L_\mu \frac{d\Phi_1}{dt} = \sum_{n=1}^{k-1} \Phi_0 (R_{n+1} - R_n).$$

Решением этой системы уравнений является выражение

$$\psi(t) = \frac{k_1}{(a-c)^2 + b^2}\left\{\frac{-c^2 - a_0 c - b_0}{c}(1 - e^{ct}) + \frac{-b_0 - 2ac - a_0 c + a^2 + b^2}{b} \times \right.$$

$$\left. \times e^{at} \cdot \sin bt + \frac{b_0(2a - c) + (a_0 + c)(a^2 + b^2)}{a^2 + b^2}\left[1 - \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b} \cdot e^{at} \sin(bt + \varphi)\right]\right\},$$

где $\operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{a}$; a, b, c или $a \pm bi$, c — корни характеристического уравнения.

При отключении напряжения процесс спадания магнитного потока состоит из двух стадий: спадания потока в процессе разрыва тока возбуждения и последующего его спадания при токе возбуждения, равном нулю, когда поток поддерживается лишь затухающими вихревыми токами в массивных частях магнитопровода. Спада-

ющий магнитный поток состоит из постоянного начального значения $\Phi_{нач}$, определяемого магнитной характеристикой, и двух экспонент с постоянными времени τ_{k1} и τ_{k2}. Первая экспонента связана с основной гармоникой вихревых токов, а вторая — с суммой его высших гармонических, причем $\tau_{k2} \approx \approx (0{,}1 \div 0{,}15)\tau_{k1}$.

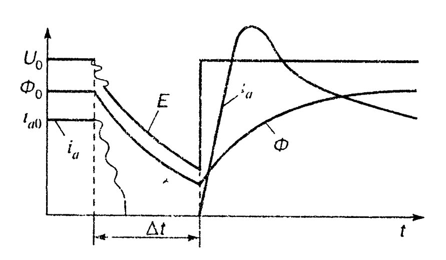


Рис. 5.9. Восстановление напряжения на зажимах ДПТ после кратковременного отключения

При восстановлении напряжения влияние вихревых токов на процесс нарастания магнитного потока сказывается тем в большей степени, чем быстрее нарастает МДС.

Решение этой системы уравнений показывает, что на любом участке кусочно-линейной аппроксимированной магнитной характеристики ток i, поток Ф и его основная волна Φ_1 представляют собой сумму начальных значений соответствующих величин некоторой постоянной слагающей (экспоненты) с постоянной времени τ и колебательной затухающей слагающей с периодом колебаний T и декрементом e^{-aT}. Применяя полученное решение к каждому аппроксимированному участку магнитной характеристики, начиная с момента восстановления напряжения, получим теоретическую кривую изменения тока во времени в рассматриваемом режиме.

На основе полученной таким образом кривой изменения тока во времени и общих уравнений вихревых токов можно рассчитать кривую изменения во времени полезного магнитного потока добавочных полюсов. Учитывая трансформаторную ЭДС секции от нарастающего магнитного потока, ее реактивной ЭДС и ЭДС вращения, индуктируемой в секции полезным магнитным потоком добавочных полюсов, можно определить кривую остаточной реактивной ЭДС. Последняя кривая дает возможность оценить напряженность и характер коммутации в процессе восстановления напряжения.

Как видно из рис. 5.9, на котором представлены графики зависимостей $\Phi = f(t)$, $i_a = f(t)$, $i_\Phi = f(t)$ и $i_\mu = f(t)$, при восстановлении напряжения наблюдается всплеск тока якоря i_a и тока возбуждения $i_в$ того же направления, стремящегося поддержать потокосцепление. Всплески токов i_a и $i_в$ возрастают с увеличением длительности перерыва питания в связи с угасанием магнитного потока и снижением соответствующей ЭДС вращения.

5.7. Наброс и сброс нагрузки двигателя с параллельным и независимым возбуждением

Во время быстрого увеличения нагрузки, остающейся затем неизменной, вначале возникает бросок тока, при этом вследствие электромагнитной и механической инерции возникает инерционный момент $J(d\omega/dt)=\Delta M$. Электромагнитный момент зависит от мгновенных значений тока якоря и магнитного потока $M=ki_a\Phi$.

Мгновенное значение потока Φ является сложной функцией тока возбуждения, тока якоря, насыщения магнитной цепи, вихревых токов. Мгновенное значение тока якоря определяется уравнением равновесия ЭДС

$$U_a=L_a(di_a/dt)+M_{bq}(di_в+dt)+i_aR_a+k\Phi\omega.$$

Уравнение равновесия моментов в двигателе

$$M-M_{нг}=J(d\omega/dt).$$

Частота вращения якоря будет изменяться в соответствии с уравнением

$$\omega=(U-i_aR_a)/(k\Phi).$$

Уравнение, характеризующее изменение тока якоря, будет иметь вид

$$i_a=Ae^{p_1t}+Be^{p_2t}+i_н.$$

Увеличение тока якоря при набросе нагрузки приведет к уменьшению ЭДС и снижению частоты вращения в соответствии с электромеханической постоянной машины. При сбросе дополнительной нагрузки переходные процессы пойдут в обратном направлении, а именно ток якоря будет снижаться с некоторой электромагнитной постоянной времени, а частота вращения будет возрастать с электромеханической постоянной времени двигателя.

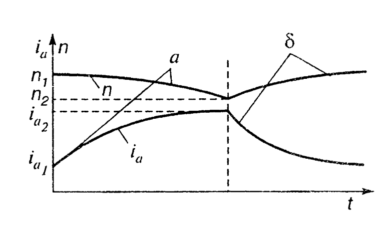


Рис. 5.10. Наброс (*а*) и сброс (*б*) нагрузки ДПТ

График изменения тока и частота вращения якоря при набросе (*а*) и сбросе нагрузки (*б*) приведен на рис. 5.10.

5.8. Особенности коммутации в переходных режимах

При кратковременных перегрузках, особенно при коротких замыканиях, прямом пуске и при повторном включении после кратковременного перерыва питания, происходит расстройство коммутации, сопровождаемое усилием искрения в щеточном контакте на коллекторе, иногда переходящего в круговой огонь. Способность МПТ к соответствующим перегрузкам определяется главным образом их коммутацией. Поэтому при проектировании машин количественная оценка коммутационной устойчивости их не только в установившихся, но и в переходных режимах является практически необходимой.

Особенностями коммутации машин в переходных режимах являются:

1. Появление в коммутируемых короткозамкнутых секциях обмотки якоря, кроме реактивной и коммутирующей ЭДС, еще трансформаторной ЭДС, в связи с изменением основного потока главных полюсов.

Трансформаторная ЭДС в двигателе при нарастании результирующего потока главного полюса имеет противоположное направление относительно средней реактивной ЭДС и при убывании — совпадает по направлению с этой ЭДС. В генераторном режиме трансформаторная ЭДС действует наоборот. Следовательно, в тех секциях обмотки якоря, в которых эти ЭДС совпадают по направлению, коммутация замедляется, а при встречном их направлении — ускоряется. Наибольшая величина трансформаторной ЭДС в неблагоприятном случае может достигать $100 \div 150\%$ значения средней реактивной ЭДС секции при номинальном токе якоря.

2. Нарушение линейной зависимости между коммутирующим потоком добавочных полюсов и током якоря; при больших всплесках тока якоря из-за насыщения и увеличения рассеяния добавочных полюсов коммутирующий поток с увеличением тока уменьшается, что будет приводить к расстройству коммутации.

3. Замедленное изменение во времени коммутирующего потока добавочных полюсов под влиянием вихревых токов в массивных сердечниках и станине при изменении тока якоря. Демпфирующее влияние вихревых токов на коммутирующий поток при упрощенных расчетах может быть приближенно учтено введением поправочного коэффициента $\Phi'_д \approx 0{,}35\Phi_д$.

4. Среднее значение результирующей ЭДС в коммутируемых секциях обмотки якоря в переходных режимах определяется алгебраической суммой реактивной, коммутирующей и трансформаторной ЭДС в них. Средняя величина напряжения между краями щетки, представляющая собой разность падений напряжения в переходных сопротивлениях контактов сбегающего и набегающего его краев,

пропорциональна результирующей ЭДС одной секции и числу перекрываемых щеткой коллекторных пластин γ, т. е. $\Delta e = \gamma (e_p + e_t - e_k)$.

Чрезмерное искрение под щетками на коллекторе, возникающее в результате расстройства коммутации, может привести к вспышке электрической дуги между разноименными щетками, превращающейся в круговой огонь, и, следовательно, серьезной аварии ЭМ. Устойчивое горение электрической дуги в цепи постоянного тока с активным сопротивлением и индуктивностью сложным образом зависит от величины напряжения, тока и расстояния между электродами, в данном случае между краем щетки и сбегающей коллекторной пластиной. По мере передвижения коллекторной пластины по потенциальной кривой между щетками вместе с удлинением дуги увеличивается напряжение разрываемой цепи, и тем больше, чем больше ток якоря.

При сильно замедленной коммутации, возникающей в переходных режимах с большими токами, напряжение между сбегающим краем щетки и коллекторной пластиной существенно возрастает. Считается, что для перехода искрения в круговой огонь необходимо, чтобы произведение мощности дуги на коэффициент нарастания напряжения по коллектору было равно или больше некоторой постоянной величины, определяемой добавочным коммутационным током в короткозамкнутой секции в момент ее размыкания.

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные факторы необходимо учитывать при анализе переходных процессов в машинах постоянного тока?
2. Особенности переходных процессов в МПТ по сравнению с машинами переменного тока.
3. Какое влияние оказывают вихревые токи на переходные процессы в МПТ?
4. Какие способы учета влияния вихревых токов на переходные процессы в МПТ вы знаете?
5. От чего зависят параметры МПТ?
6. Какие факторы оказывают основное влияние на процесс возбуждения МПТ?
7. Условия самовозбуждения ГПТ.
8. Чем характерен режим внезапного к.з. ГПТ?
9. Особенности процесса внезапного к.з. генераторов постоянного тока с параллельным и независимым возбуждением.
10. Почему реальный ток к.з. ГПТ оказывается меньше идеального, обусловленного ЭДС и сопротивлением цепи якоря?
11. Чем характерен режим восстановления напряжения на двигателе после кратковременного отключения?
12. Как и почему влияет длительность перерыва питания ДПТ на ток якоря в переходном режиме?
13. Чем характерен режим наброса и сброса нагрузки?
14. Особенности коммутации МПТ в переходных режимах.
15. Почему в переходных режимах коммутация оказывается замедленной?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Важнов А. И.** Переходные процессы в машинах переменного тока.— М.: Энергия, 1980.

2. **Вольдек А. И.** Электрические машины.— М.: Энергия, 1978.

3. **Гольдберг О. Д.** Испытания электрических машин.— М.: Высшая школа, 1990.

4. **Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.** Проектирование электрических машин.— М.: Высшая школа, 1984.

5. **Горев А. А.** Переходные процессы синхронной машины.— М.: Высшая школа, 1950.

6. **Грузов Л. Н.** Методы математического исследования электрических машин.— М.: ГЭИ, 1953.

7. **Ермолин Н. П.** Переходные процессы в машинах постоянного тока.— М.: ГЭИ, 1951.

8. **Жиц М. З.** Переходные процессы в машинах постоянного тока.— М.: Энергия, 1974.

9. **Иванов-Смоленский А. В.** Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование.— М.: Энергия, 1969.

10. **Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В., Власов А. И., Кузнецов В. А.** Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах.— М.: Энергоиздат, 1986.

11. **Казовский Е. Я.** Переходные процессы в электрических машинах переменного тока.— М.: АН СССР, 1962.

12. **Ковач К. П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока.— М.: ГЭИ, 1963.

13. **Копылов И. П.** и др. Математическое моделирование асинхронных машин.— М.: Высшая школа, 1987.

14. **Копылов И. П.** Электрические машины.— М.: Энергоатомиздат, 1986.

15. **Кононенко Е. В., Сипайлов Г. А., Хорьков К. А.** Электрические машины (специальный курс).— М.: Высшая школа, 1987.

16. **Конторович М. И.** Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях.— М.: ГИТТЛ, 1955.

17. **Костенко М. П.** Электрические машины. Специальная часть.— М.: ГЭИ, 1949.

18. **Костенко М. П., Пиотровский Л. М.** Электрические машины.— М.: Энергия, 1973.

19. **Лайбл Т.** Теория синхронной машины при переходных процессах.— М.: ГЭИ, 1957.

20. **Левинштейн М. Л.** Операционное исчисление в задачах электротехники.— М.: Энергия, 1972.

21. **Петров Г. Н.** Электрические машины.— М.: ГЭИ, 1963.

22. **Постников И. М.** Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин.— М.: Высшая школа, 1975

23. **Рюденберг Р.** Переходные процессы в электроэнергетических системах.— М.: Изд. иностр. литер , 1955.

24. **Свириденко И. С.** Исследование методов ослабления поля в тяговых двигателях последовательного возбуждения на городском электротранспорте.— М.: Изд. ОНТИ АКХ им. Памфилова, 1959.
25. **Свириденко И. С.** Переходные процессы в электрических машинах.— М.: МГОУ, 1994.
26. **Соколов М. М.** и др. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе.— М.: Энергия, 1967.
27. **Сорокер Т. Г.** Переходные процессы синхронных машин.— М.: Высшая школа, 1960.
28. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. — М.: ГЭИ, 1963.
29. **Трещев И. И.** Электромеханические переходные процессы в машинах переменного тока. — М.: Энергия, 1980.
30. **Трещев И. И.** Методы исследования электромагнитных процессов в машинах переменного тока. — М.: Энергия, 1969.
31. **Теумин И. И.** Справочник по переходным электрическим процессам. — М.: Связьиздат, 1951.
32. **Ульянов С. А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1970.

ЧАСТЬ III
Специальные вопросы электрических аппаратов

В двух первых разделах части III рассматриваются магнитные материалы, векторные диаграммы и переходные процессы в электрических аппаратах; в третьем — современные технологии построения графиков, поясняемые примерами из теории и расчета электрических аппаратов. При изучении первых трех вопросов используется система MathCAD [3, 4] (далее MCAD — аббревиатура английских слов Mathematical Computer Aided Design, которые в свободном переводе означают интегрированную систему для автоматизации математических расчетов). Материал третьего раздела базируется на программе, специально созданной для построения графиков на объектно ориентированном и событийно управляемом алгоритмическом языке Visual Basic, а также на программах Excel и Word для Windows.

Система MCAD разработана фирмой MathSoft (США) и приобрела заслуженную популярность еще в середине 80-х годов, но особенно широко стала известна после того, как еще в версии 3.0 в начале 90-х годов стала исполняться на платформе Windows. По сей день MCAD остается единственной математической системой, в которой описание решения дается с помощью привычных математических формул и знаков.

Часть III книги написана в расчете на то, что читатель уже знаком с системой MCAD хотя бы на уровне пользователя. Для тех, кто встречается с ней впервые, рекомендуем русский перевод фирменного руководства пользователя [3], особенно его гл. 1 (Основы). Для начинающих лучшей книги мы не знаем. И пусть читателя не смущает ее большая толщина: все вопросы там изложены очень понятно и доходчиво. Причем руководство построено так, что для успешной работы не обязательно читать все и не обязательно изучать материал в той последовательности, в которой он изложен.

Некоторые неудобства для пользователей англоязычной версии создает ориентация [3] на русскоязычный вариант системы. Подробное описание главного меню и интерфейса хорошо даны в [4], причем приводятся как переводы на русский язык, так и английские эквиваленты команд. Поэтому для начинающих пользователей идеальным можно считать сочетание учебников по MCAD [3] и [4]. Кратко основные сведения, необходимые пользователю для работы в системе MCAD, приведены в Приложении 21.

Основной результат работы программиста и пользователя в системе MCAD называется не программой, как принято в алгоритмических универсальных языках программирования, а *рабочим документом* (document или worksheet — в оригинале). Часто далее слово «рабочий» мы будем опускать, имея его в виду. Документ объединяет математический алгоритм решения задачи с текстовыми комментариями и результатами вычислений в форме символов, таблиц и графиков. MCAD оперирует в своих документах тремя редакторами: текстовым, математическим и графическим. В математическом редакторе формулы записываются с использованием общепринятой символики. Наличие трех редакторов и особенности математического делают рабочие документы MCAD похожими на тексты технических книг и статей. При загрузке они проводят расчеты и дают конкретные результаты (по умолчанию — в автоматическом режиме, но можно переключиться и в ручной).

Для исполнения некоторых рабочих документов, приведенных в Приложениях ч. III настоящей книги, необходим MCAD версии не ниже 6.0 Plus Pro. Приставка Pro означает профессиональную редакцию. Необходимость в ней вызвана тем, чо в стандартной редакции отсутствует возможность работы с внутренними программами, признаком которых является одна или несколько вертикальных линий после знака присваивания (двоеточие и равенство рядом друг с другом). Такие внутренние программы имеются в документах DRDCON (Приложение 7), DROFF (Приложение 8), DRLOOP (Приложение 9) и DUON (Приложение 14). Принципиально можно внутренние программы Приложений 7 — 9 с операторами if переделать в строки с функциями if, как это сделано в рабочих документах B(H) (Приложение 1), H(B) (Приложение 2) и H(B)LOOP (Приложение 3). Строки получаются несколько длиннее, но зато тогда рабочие документы можно запускать на исполнение в стандартной редакции MCAD. Документ DUON, который содержит внутренние циклы, переделать для исполнения в стандартной версии принципиально тоже можно, но получается слишком громоздко, особенно при большем, чем в Приложении 14, числе повторений. Поэтому мы предпочитали работать в версии 6.0 Plus Pro, нежели в 8.0 Standard edition. В последней записан рабочий документ VD.mcd (Приложение 4), поэтому запустить его в MCAD 6.0 Plus Pro можно только в случае, если его текст заново набрать в этой (6-й) версии.

Как уже было сказано, в III части книги рассматриваются следующие вопросы теории электрических аппаратов: магнитные материалы, векторные диаграммы и переходные процессы. Каждому из них посвящено не менее одного рабочего документа. В каждом из этих вопросов используется одна или несколько замечательных возможностей MCAD. Например, в документах по магнитным материалам (п. 3.1 и Приложения 1 — 3) показано, как легко с помощью MCAD аппроксимировать кривые намагничивания и петли гистерезиса магнитных материалов; в документах по переходным процессам (гл. 4 и Приложения 5 — 11) показано, как просто с помощью MCAD решаются линейные и нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения. В документе DCON (гл. 5 и Приложение 14 — самое сложное и большое приложение книги) исследуется динамика включения электромагнита постоянного тока. В нем используются многие возможности MCAD, в том числе: аппроксимация функций двух переменных, построение трехмерных графиков, решение системы из трех обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в электрической цепи обмотки и процесс движения якоря электромагнита при его включении.

При написании части III использованы следующие соглашения:

1. Если внутри ч. III книги ссылки на рисунки, главы и пр. даются без упоминания номера части, то это означает, что они относятся к ч. III.

2. Все рубрики внутри глав и внутри приложений далее называются пунктами и по тексту обозначаются буквой п с точкой. Не следует п. путать с наименованием типографской единицы размера шрифта (пункт), которое в тексте ч. III тоже упоминается без сокращения слова (1 пункт примерно равен 0,376 мм).

3. Все рабочие документы MCAD имеют расширение .mcd, которое не всегда указывается, но всегда имеется в виду. То же относится и к другим расширениям.

4. Между сомножителями в формулах основной части текста и в текстовой части рабочих документов всегда ставится знак произведения (точка или звездочка). Это сделано для того, чтобы не спутать произведение односимвольных величин с обозначением переменной, которая может включать в себя несколько символов, стоящих рядом друг с другом в одном регистре. Такое многосимвольное обозначение величин мы используем в книге не только в QB-программе и MCAD-документах, но и в основном тексте для соответствия этих обозначений.

5. В основном тексте в качестве разделителя дробной и целой частей десятичного числа принята запятая, в приложениях (MCAD-документах и QB-программе) — точка, в том числе и в текстовых областях MCAD-документов, и в русскоязычных комментариях и сообщениях с экрана QB-программы.

6. В связи с тем, что документы MCAD плохо приспособлены к непосредственному воспроизведению офсетным способом (многие

знаки получаются практически неразличимыми), пришлось их набирать в текстовом процессоре. При этом:

1) текстовая и математическая области набраны шрифтом Times. Различить их можно только по языку: в математической области используются арабские цифры, латинские и греческие буквы; в текстовой области — русские буквы и арабские цифры. Переменные текстовой области, соответствующие переменным математической области и поэтому состоящие из арабских цифр, латинских и греческих букв, в текстовой области даны полужирным шрифтом;

2) порядок следования операторов и функций в математической области не нарушен, но для упрощения верстки в некоторых случаях пришлось пойти на нарушение местоположения рисунков.

При самостоятельном воспроизведении рабочих документов MCAD, приведенных в учебном пособии, необходимо сделать разными шрифты математической и текстовой областей и расположить рисунки в требуемых местах (каждый рисунок должен находиться, по крайней мере, после строки, в которой вводится дискретная переменная, используемая при его построении).

7. Используется только Международная система единиц СИ. Основные, дополнительные и производные единицы СИ не всегда оговариваются и не всегда обозначены. Применяются также стандартные приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц.

8. Если строка листинга программы или файла данных заканчивается знаком подчеркивания, то это означает, что следующие за ним символы на самом деле не переносятся на новую строку, как напечатано в книге, а продолжаются в той же, начиная с места, занятого знаком подчеркивания.

9. Под словом «щелчок» (на объекте) имеется в виду такая последовательность действий: расположить острие стрелки указателя мыши в пределах площади объекта, нажать и отпустить левую кнопку мыши. В качестве объекта здесь могут использоваться: кнопка инструмента, окна диалога, формы; флажок; опция; поле окна диалога; строка меню и пр. Далее кавычки у слова «щелчок» опускаем.

10. Слова «диаграмма» и «график» считаются синонимами.

11. Номера строк, на которые делаются ссылки, даны в круглых скобках. В основном тексте они обозначены двумя числами с точкой между ними (первое число — номер главы), в приложениях — одним числом без точки.

12. Названия окон, рамок, вкладок, флажков, полей и кнопок диалогов; команд меню; кнопок панелей инструментов; кнопок и названий форм выделены полужирным шрифтом.

13. Названия клавиш клавиатуры даны в квадратных скобках.

14. Слово «вектор» употребляется, главным образом, в том смысле, в котором оно употребляется в информатике (столбец чисел или одномерный массив) — кроме п. 3.2 и Приложения 4 по векторной диаграмме.

Раздел первый

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В этом разделе рассматриваются общие свойства магнитных материалов, а также характеристики отечественных магнитомягких ферромагнитных материалов, применяемых в технике для магнитопроводов электрических аппаратов, машин и приборов.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Магнитная индукция в любой точке внутри вещества

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M, \tag{1}$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; H — результирующая напряженность магнитного поля внутри вещества; M — намагниченность.

Намагниченность (ее также называют магнитным моментом единицы объема вещества) нелинейно связана с результирующей напряженностью внешнего магнитного поля:

$$M = æ \cdot H, \tag{2}$$

где æ — магнитная восприимчивость. В СИ магнитная индукция B измеряется в Тл; H и M — в А/м; æ — безразмерная величина. В зависимости от численного значения æ все вещества можно разбить на группы, указанные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Группа	Магнитная восприимчивость
Диамагнетик	$æ < 0$; $\quad |æ| \approx 10^{-7} - 10^{-1}$
Парамагнетик	$æ > 0$; $\quad æ \approx 10^{-6} - 10^{-4}$
Ферро-, ферримагнетик	$æ \approx 10^{0}...10^{6}$
Антиферромагнетик	$æ > 0$; $\quad æ \approx 10^{-5} - 10^{-2}$

Техническое применение нашли, главным образом, ферро- и ферримагнитные материалы. Вместе ферро- и ферримагнитные материалы называются *магнитными*. Магнитная восприимчивость этих материалов отличается большими значениями (см. табл. 1.1) и нелинейно зависит от температуры и напряженности магнитного поля.

Намагниченность магнитных материалов при увеличении температуры уменьшается и становится практически равной нулю при температуре, которая называется температурой Кюри (или точкой Кюри).

Статическими называются характеристики магнитных материалов, снятые в постоянных или медленно меняющихся полях, *динамическими* — характеристики, полученные в переменных полях.

1.1. Статические характеристики

Если многократно изменять напряженность магнитного поля внутри ферромагнитного материала от $+H_1$ до $-H_1$ (рис. 1.1) и наоборот, то после достаточно большого числа таких изменений (обычно 10 — 12 циклов) зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля приобретает вид замкнутой кривой $M_1m_1N_1n_1M_1$. Если при всех последующих изменениях напряженности магнитного поля от $+H_1$ до $-H_1$ и наоборот зависимость B(H) повторяется, то такую замкнутую кривую называют *симметричной петлей гистерезиса по магнитной индукции*. Если изменение напряженности магнитного поля происходит столь медленно, что можно пренебречь переходными процессами, то такую петлю можно назвать *статической*, если быстро — то *динамической*.

В настоящей работе будут рассматриваться только симметричные петли гистерезиса по магнитной индукции, поэтому слова «симметричные» и «по магнитной индукции» в дальнейшем часто будут опущены (остается термин *«петля гистерезиса»*). В п. 1.1 имеются в виду только статические петли, о динамических будет сказано в п. 1.2.

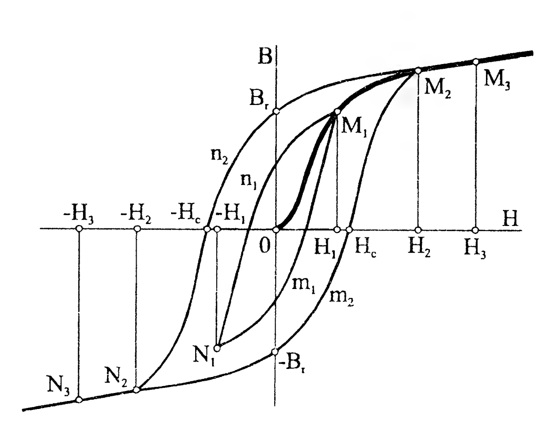


Рис. 1.1. Симметричные петли гистерезиса и основная кривая намагничивания материала

На рис. 1.1 показаны две симметричные петли гистерезиса — для напряженностей магнитного поля от $-H_1$ до $+H_1$ (кривая $N_1n_1M_1m_1N_1$) и для напряженностей магнитного поля от $-H_2$ до $+H_2$ (кривая $N_2n_2M_2m_2N_2$). Если дальнейшее увеличение H от H_2 до H_3 (см. рис. 1.1) не приводит к расширению симметричной петли гистерезиса, а только добавляет ей участки

на концах в виде линий M_2M_3 и N_2N_3, то такую петлю ($N_2n_2M_2m_2N_2$) можно назвать *предельной симметричной петлей гистерезиса по магнитной индукции* (мы будем называть ее *«предельной петлей гистерезиса»*).

Предельная петля гистерезиса пересекает ось абсцисс в точках H_c и $-H_c$, а ось ординат — в точках B_r и $-B_r$. Напряженность магнитного поля H_c называется коэрцитивной силой, магнитная индукция B_r — остаточной магнитной индукцией. Участок предельной петли гистерезиса, расположенный во втором квадранте (часть петли между точками $-H_c$ и B_r на рис. 1.1), получил название *кривой размагничивания*. Она используется при расчете постоянных магнитов.

Кривая, соединяющая вершины M_1, M_2 и M_3 симметричных петель гистерезиса по магнитной индукции (жирная линия на рис. 1.1), называется *основной кривой намагничивания по магнитной индукции*; в литературе по электрическим аппаратам и машинам обычно она имеется в виду под термином «кривая намагничивания». В литературе по магнитным материалам, в справочниках на магнитные материалы приводится, как правило, основная кривая намагничивания по индукции, часто это делается без всяких пояснений и уточнений, хотя существуют и другие виды кривых намагничивания по индукции.

Методику снятия основной кривой намагничивания и петель гистерезиса, обязательную для технических условий, устанавливающих требования к магнитомягким материалам, регламентируют ГОСТ 8.377 — 80 «Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик» и ГОСТ 12119 — 80 «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств». Так как основная кривая намагничивания получается путем многократной симметричной коммутации цепи постоянного тока для каждого фиксированного значения тока (напряженности магнитного поля), то основную кривую намагничивания некоторые авторы, особенно в старых источниках, называют коммутационной кривой намагничивания (в настоящее время этот термин употребляется редко).

Основная кривая намагничивания и симметричные петли гистерезиса по ГОСТ 8.377 — 80 и 12119 — 80 снимаются по схеме с баллистическим гальванометром (или веберметром). Из теории работы баллистического гальванометра известно, что угол первого поворота его рамки пропорционален изменению магнитного потока, соответствующему статическим состояниям магнитного материала в начале и в конце коммутации — при условии, что процесс коммутации закончился до начала движения рамки баллистического гальванометра. По ГОСТ 8.377 — 80 длительность импульса, возникающего в измерительной обмотке образца, не

должна превышать 0,1 от времени первого поворота рамки баллистического гальванометра. В противном случае применяется веберметр.

Самой сложной для понимания характеристикой ферромагнитного материала является «магнитная индукция насыщения». Остановимся на этом понятии более подробно. На рис. 1.2 приведена основная кривая намагничивания по магнитной индукции (кривая *1*). Ее можно представить в виде суммы кривой *2*, которая является зависимостью $\mu_0 \cdot M$ от напряженности магнитного поля H, и прямой *3*, которая является зависимостью $\mu_0 \cdot H$ от H. Обычно под *кривой намагничивания материала по намагниченности* имеют в виду зависимость намагниченности M от напряженности поля H. Кривая *2* — это фактически основная кривая намагничивания по намагниченности, ординаты которой увеличены в μ_0 раз. Далее зависимость $\mu_0 \cdot M$ от H будем тоже, как и зависимость M от H, называть кривой намагничивания по намагниченности.

При бесконечно большом значении напряженности магнитного поля намагниченность ферромагнитного материала равна намагниченности насыщения M_s. Значение M_s зависит от температуры. Оно максимально при абсолютном нуле и практически равно нулю при температуре, большей или равной температуре Кюри. При любых значениях напряженности магнитного поля намагниченность ферромагнетика теоретически меньше намагниченности насыщения. Однако для инженерных расчетов можно считать, что существует некоторая достаточно большая напряженность магнитного поля H_s (рис. 1.2), начиная с которой кривая намагничивания по намагниченности (*2* на рис. 1.2) с достаточной для практики точностью превращается в горизонтальную прямую линии, а кривая намагничивания по индукции (*1* на рис. 1.2) — в прямую линию, имеющую угол α_0 к оси абсцисс, тангенс которого равен μ_0 с учетом масштабов осей координат H и B. Напряженность магнитного поля H_s, при которой это имеет место, можно назвать *напряженностью технического насыщения*, а намагниченность M_s, которую ферромагнетик практически будет иметь при всех $H > H_s$, — *намагниченностью технического насыщения*.

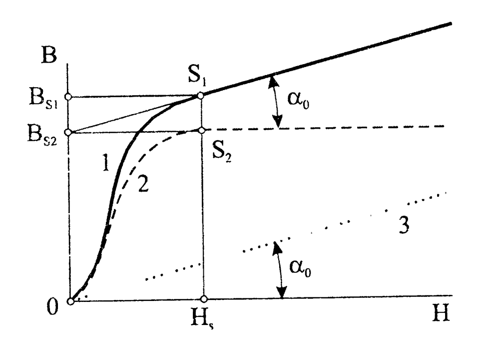


Рис. 1.2. Основная кривая намагничивания материала по магнитной индукции

Точки S_1 на кривой намагничивания по индукции и S_2 на кривой намагничивания по намагниченности — *точки технического насыщения* ферромагнитного материала. Ор-

дината B_{S1} точки S_1 по ГОСТ 17033 — 71 со сроком действия до 1976 г. называлась индукцией насыщения. ГОСТ 19693 — 74 «Материалы магнитные. Термины и определения» *магнитной индукцией технического насыщения* B_s называет ординату точки пересечения продолжения прямолинейного участка кривой намагничивания по индукции с осью ординат. Из рис. 1.2 нетрудно видеть, что $B_s = B_{S2} = \mu_0 \cdot M_s$. В дальнейшем под *магнитной индукцией насыщения* имеется в виду B_s по ГОСТ 19693 — 74 (слово «технического» подразумевается, но не всегда пишется).

Из-за того, что намагниченность ферромагнетика все же слегка растет, величина H_s несколько неопределенна. Фактически она зависит от точности аппаратуры для снятия магнитных характеристик и сильно зависит от возможностей экспериментального получения больших напряженностей магнитного поля (порядка 10^6 — 10^7 А/м для низкоуглеродистых сталей). Экспериментальное определение магнитной индукции технического насыщения поэтому весьма затруднено, а к значениям B_s, приведенным в литературе, следует относиться осторожно. Значение B_s во многом определяет точность расчета магнитных систем, работающих при магнитных индукциях, больших B_{S1} (рис. 1.2), поэтому уточнение значений магнитных индукций технического насыщения магнитомягких материалов столь важно для техники.

Для характеристики свойств ферромагнитного материала при постоянном магнитном потоке пользуются понятиями различных статических магнитных проницаемостей. *Абсолютная магнитная проницаемость* (в дальнейшем просто «*магнитная проницаемость*»)

$$\mu = B/H.$$

Для точки А основной кривой намагничивания *1* на рис. 1.3

$$\mu = B_A/H_A \equiv \operatorname{tg}\alpha.$$

Начальная абсолютная магнитная проницаемость (или просто «*начальная магнитная проницаемость*»)

$$\mu_н = \lim_{H \to 0} (B/H) \equiv \operatorname{tg}\alpha_н,$$

где $\mu_н$ и $\alpha_н$ показаны на рис. 1.3.

Максимальная магнитная проницаемость (абсолютная)

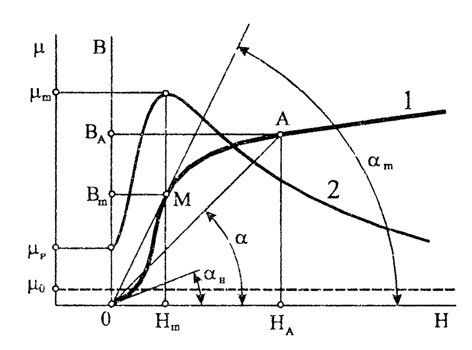


Рис. 1.3. Основная кривая намагничивания материала (*1*) и зависимость магнитной проницаемости (*2*) от напряженности магнитного поля

$$\mu_m = B_m/H_m \equiv tg\alpha_m.$$

Значения μ_m, B_m, H_m и α_m показаны на рис. 1.3.

Любая из вышеприведенных абсолютных магнитных проницаемостей станет относительной, если ее разделить на μ_0. Например, *относительная магнитная проницаемость* для любой точки кривой намагничивания

$$\mu_r = \mu/\mu_0 = B/(\mu_0 \cdot H).$$

Относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз магнитная индукция внутри ферромагнетика больше той магнитной индукции, которая была бы в этом месте при отсутствии ферромагнетика (при той же напряженности магнитного поля). Так как кроме внешнего намагничивающего поля в ферромагнетике имеется еще и поле, созданное намагниченностью самого ферромагнитного материала, то относительная магнитная проницаемость при любых сколь угодно больших магнитных индукциях и напряженностях магнитного поля всегда больше единицы, а абсолютная всегда больше μ_0. Так, для низкоуглеродистых электротехнических сталей при индукции 4 Тл, значительно превосходящей магнитную индукцию насыщения этих материалов (2,12÷2,15 Тл), относительная магнитная проницаемость больше двух. Таким образом, магнитное сопротивление такого ферромагнетика потоку при магнитной индукции 4 Тл будет меньше, чем у воздуха, примерно в два раза. Наименьшим магнитным сопротивлением будет обладать магнитопровод, работающий при магнитной индукции B_m, при которой проницаемость максимальна.

Кривая зависимости статической магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля μ(H) показана на рис. 1.3 (кривая *2*). Она пересекает ось абсцисс в точке $\mu_н$, для абсциссы H_m имеет максимум (μ_m) и при $H \to \infty$ стремится к асимптоте с ординатой μ_0. Для расчета магнитных цепей электрических аппаратов, работающих на постоянном токе, пользуются как основной кривой намагничивания (статической), так и кривой изменения статической магнитной проницаемости, но не от напряженности магнитного поля, как показано на рис. 1.3, а от индукции. Можно использовать также кривую изменения от индукции удельного магнитного сопротивления

$$\rho = H/B = 1/\mu.$$

В литературе по электрическим аппаратам для расчета магнитных цепей постоянного тока получили наибольшее распространение методы расчета, использующие непосредственно основную кривую намагничивания (статическую), поэтому эту кривую намагничива-

ния будем считать основной характеристикой ферромагнитного материала на постоянном токе. Следует иметь в виду, однако, что при расчете магнитной системы с магнитопроводом из ферромагнитного материала мы реально имеем дело в общем случае не с той кривой намагничивания, которую расчетчик может найти в литературе, а с некоторой другой, которая находится в диапазоне разброса кривых намагничивания для материала выбранной марки, так как свойства материалов зависят от многих факторов: различия в химическом составе (в пределах, гарантированных стандартом), режима плавки, способа изготовления материала, режима термообработки, способа изготовления магнитопровода, наличия повторного отжига, конструкции магнитопровода и т. п. Если к этому добавить еще несовершенство методов измерения магнитных характеристик и естественное старение (см. ниже), то реальный разброс в кривых намагничивания может быть весьма существенным. Особенно большие различия бывают в начальной и максимальной магнитных проницаемостях (а значит, и в напряженностях магнитного поля при фиксированной магнитной индукции); меньшие отличия — в магнитных индукциях насыщения. Имеется разброс также и в значениях коэрцитивной силы и в остаточной магнитной индукции. При расчете магнитных систем из стандартных материалов, как правило, следует ориентироваться на показатели, указанные в ГОСТах на этот материал. Расчет должен быть сделан, кроме того, с некоторым запасом на старение и возможное ухудшение магнитных характеристик, вызванное особенностями конструкции и технологии изготовления магнитопровода. Кроме того, необходимо учесть отличие реальных условий работы от симметричного перемагничивания, при котором снимается основная кривая намагничивания. При выборе коэффициента запаса следует также принять во внимание, что возможное ухудшение свойств во время эксплуатации сильно зависит от типа и марки материала. Из материалов, рассмотренных в гл. 2, наибольшим он может быть у железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью, меньшим — у низкоуглеродистых сталей. К сожалению, полностью отказаться от кривых намагничивания, известных по литературным данным и иногда сильно отличающихся друг от друга (для одного и того же материала), не удается, так как существующие стандарты, как правило, дают координаты только нескольких точек кривых намагничивания.

Свойство ферромагнитных материалов, которое заключается в естественном ухудшении во времени их магнитных характеристик (главным образом, в увеличении коэрцитивной силы и уменьшении магнитной проницаемости при работе на постоянном токе), называется старением. *Старение для магнитомягких материалов, используемых на постоянном токе*, принято характеризовать *коэффициентом старения*

$$k_{Hc}=[(H_{c1}-H_{c0})/H_{c0}]\cdot 100\%,$$

где H_{c0} и H_{c1} — коэрцитивные силы до и после старения. При испытании ферромагнитный материал подвергают искусственному старению, которое состоит в нагреве при 120 °С в течение 120 ч (по ГОСТ 3836 — 83, ГОСТ 11036 — 75).

1.2. Динамические характеристики ферромагнитных материалов

В ферромагнетике при его перемагничивании переменным магнитным потоком выделяется активная мощность от потерь не только на гистерезис, но и на вихревые токи. В некоторых случаях имеют место еще и дополнительные потери. Объяснение их природы выходит за рамки настоящей работы. Дополнительные потери, вместе с потерями на вихревые токи, называются *динамическими*.

Петля гистерезиса, площадь которой, как известно, пропорциональна суммарным потерям на перемагничивание за один цикл, расширяется. Иногда меняется и ее форма (округляются вершины). В качестве примера на рис. 1.4 показаны верхние половины статической *1* и динамической *2* петель гистерезиса холоднокатаной электротехнической стали марки 3413 [12]. Как видно из рис. 1.4, максимальная напряженность магнитного поля при частоте 50 Гц больше, чем максимальная напряженность магнитного поля при статическом перемагничивании.

Рис. 1.4 показывает, что в общем случае для расчета магнитных систем переменного тока традиционными для электроаппаратостроения «цепевыми» методами с использованием комплексных величин лучше пользоваться характеристиками, полученными на переменном токе. Если при расчете магнитной цепи постоянного тока сопротивление магнитопровода можно учесть с помощью одной из трех следующих кривых: основной кривой намагничивания B(H), кривой изменения магнитной проницаемости μ(B) или кривой изменения удельного магнитного сопротивления ρ(B), то на переменном токе для аналогичного расчета необходимы две, из которых одна отражает затраты полной или реактивной мощности на перемагничивание, а другая — затраты активной мощности. Методику снятия динамических характеристик регламентирует ГОСТ 12119 — 80 «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств». Познакомимся более подробно с характеристиками материалов, которые можно встретить в литературе.

Прежде всего это динамическая кривая намагничивания, представляющая собой зависимость между амплитудой магнитной индукции B_m (при синусоидальном изменении магнитного потока во

времени) и обычно действующей напряженностью магнитного поля H. Под действующим значением H имеется в виду значение, которое в замкнутой магнитной цепи связано с действующим намагничивающим током I законом полного тока

$$H = I \cdot w/l,$$

где w — число витков намагничивающей катушки; l — средняя длина линии индукции. Вместо H по оси абсцисс такой кривой намагничивания может быть отложена амплитуда эквивалентной синусоиды напряженности магнитного поля

$$H_{mэ} = \sqrt{2} \cdot H.$$

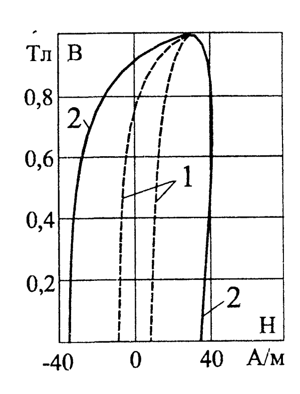


Рис. 1.4. Статическая (*1*) и динамическая (*2*) петли гистерезиса холоднокатаной анизотропной стали 3413 (толщина листа 0,5 мм, частота 50 Гц для петли 2)

Для режима синусоидальной магнитной индукции из литературы известны и другие динамические кривые намагничивания: зависимость между амплитудой магнитной индукции B_m и амплитудой или действующим значением первой гармонической составляющей напряженности магнитного поля. Однако для расчета действующего намагничивающего тока они могут использоваться только в режиме, когда при синусоидальной кривой магнитной индукции кривую напряженности магнитного поля практически можно считать тоже синусоидальной. Такой режим имеет место в основном в ненасыщенных магнитных системах. В общем случае нельзя расчет магнитной системы переменного тока проводить также и по статической кривой намагничивания.

На рис. 1.5 приведены некоторые кривые намагничивания для холоднокатаной анизотропной стали 3413 [12]. Рисунок наглядно показывает большую разницу в значениях напряженностей поля, которые мы получим для одной и той же индукции при использовании разных кривых. Для расчета действующего переменного тока следует использовать кривую *4* или кривую *2*, разделив абсциссы последней на $\sqrt{2}$. Статические кривые намагничивания для ферромагнитных материалов, работающих в магнитных цепях переменного тока, в общем случае могут использоваться лишь для качественного сравнения этих материалов, например, с точки зрения отличия их магнитных индукций насыщения. При совпадении во времени максимумов магнитной индукции и напряженности магнитного поля кривая намагничивания на переменном токе в виде зависимости амплитуды магнитной индукции от максимального значения напряженности магнитного поля близка к статической

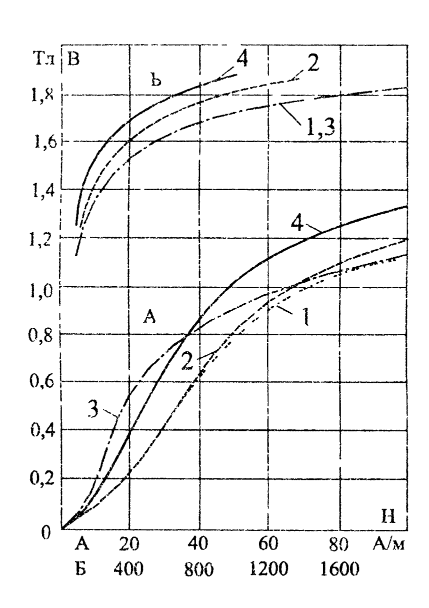


Рис. 1.5. Кривые намагничивания холоднокатаной анизотропной стали 3413 толщиной 0,5 мм [12]: *1, 2, 3* — при частоте 50 Гц; *3* — основная кривая намагничивания (статическая). По оси абсцисс отложена напряженность магнитного поля: для кривой *1* — максимальная; для кривой *2* — действующая, умноженная на $\sqrt{2}$; для кривой *4* — действующая. По оси ординат для кривых *1, 2, 4* отложена амплитуда магнитной индукции

кривой намагничивания. Это обычно имеет место в горячекатаных трансформаторных сталях (трансформаторными в старой литературе по электрическим машинам называются листовые электротехнические стали с содержанием кремния или алюминия или обоих этих элементов в диапазоне 3 — 5%, динамными — с содержанием кремния или алюминия или обоих этих элементов до 3%). На совпадении вышеозначенных кривых намагничивания основан один из методов расчета реактивной составляющей намагничивающегося тока трансформаторов, который исходит из предположений о том, что мгновенная реактивная составляющая напряженности магнитного поля связана с мгновенной магнитной индукцией по статической основной кривой намагничивания. Однако рассчитать этим методом действующий намагничивающий ток значительно сложнее, чем по динамической кривой намагничивания. Использование динамической кривой намагничивания наиболее удобно в магнитных цепях без воздушных зазоров или с малыми зазорами, что не характерно для электрических аппаратов, но часто встречается в электрических машинах.

Другой наиболее распространенной характеристикой ферромагнитных материалов на переменном токе является зависимость удельных потерь p (активной удельной мощности в Вт/кг) на перемагничивание единицы массы от амплитуды магнитной индукции [12, 17]. По этой характеристике можно определить активную составляющую тока катушки. Приводятся также зависимости удельной полной намагничивающей мощности s в В · А/кг [11, 12] и удельной реактивной намагничивающей мощности q в вар/кг от амплитуды магнитной индукции. Полная намагничивающая мощность s связана с полным током намагничивающей катушки, реактивная q — с реактивной составляющей тока. В [11, 12] полная намагничивающая мощность обозначена буквой q.

В электрических аппаратах на переменном токе широкое распространение получил комплексный метод расчета магнитной цепи. В качестве характеристик ферромагнитного материала в этом методе используются комплексное ρ_Z, активное ρ_R и реактивное ρ_X удельные магнитные сопротивления:

$$\rho_Z=\rho_R+j\rho_X.$$

Модуль комплексного удельного магнитного сопротивления может быть вычислен для любой точки динамической кривой намагничивания по формуле

$$\rho_Z=\sqrt{2}\cdot H/B_m,$$

где H — действующая напряженность магнитного поля; B_m — амплитуда магнитной индукции. Следует учесть, что Б. К. Буль обычно под этой величиной имел в виду $\rho'_Z=H/B_m$, поэтому ординаты кривых ρ'_Z, а также кривых ρ'_R и ρ'_X, приведенных в [6, 7], при использовании здесь и в [1] следует увеличить в $\sqrt{2}$ раз ($\rho_Z=\rho'_Z\cdot\sqrt{2}$; $\rho_R=\rho'_R\cdot\sqrt{2}$; $\rho_X=\rho'_X\cdot\sqrt{2}$).

Модуль комплексного удельного магнитного сопротивления ρ_Z может быть рассчитан по кривой зависимости удельной намагничивающей мощности s от амплитуды магнитной индукции B_m по формуле:

$$\rho_Z=s\cdot\gamma/(\pi\cdot f\cdot B_m^2),$$

где s — полная удельная намагничивающая мощность на единицу массы, В·А/кг; γ — плотность, кг/м^3; f — частота, Гц.

Удельное реактивное магнитное сопротивление может быть найдено по кривой зависимости удельной активной намагничивающей мощности p в Вт/кг от амплитуды магнитной индукции по формуле, аналогичной предыдущей:

$$\rho_X=p\cdot\gamma/(\pi\cdot f\cdot B_m^2).$$

Удельное активное магнитное сопротивление

$$\rho_R=q\cdot\gamma/(\pi\cdot f\cdot B_m^2),$$

где q — удельная реактивная намагничивающая мощность, вар/кг.

Если имеются справочные материалы, в которых ферромагнетик характеризуется через комплексную магнитную проницаемость

$$\mu=B_m/(\sqrt{2}\cdot H)=\mu_R-j\mu_X,$$

где μ_R и μ_X — активная и реактивная составляющие комплексной магнитной проницаемости, то по кривым зависимостей μ, μ_R и μ_X от B_m можно перейти к кривым удельных магнитных сопротивлений по формулам:

$$\rho_Z = 1/\mu;\ \rho_R = \mu_R/\mu^2;\ \rho_X = \mu_X/\mu^2.$$

В этих формулах под μ имеется в виду модуль комплексной магнитной проницаемости.

Расчет магнитной цепи переменного тока можно провести, если имеются зависимости от амплитуды магнитной индукции любых двух из трех удельных мощностей намагничивания (s, q и p). Вместо кривой $s(B_m)$ может использоваться динамическая кривая намагничивания $B_m(H)$ или $B_m(\sqrt{2}\cdot H)$. Расчет магнитной цепи можно провести также, если имеются любые две зависимости от B_m удельных магнитных сопротивлений ρ_Z, ρ_R и ρ_X или любые две кривые изменения от B_m удельных магнитных проницаемостей μ, μ_R и μ_X.

Старение магнитного материала, работающего в цепях переменного тока, выражается в увеличении коэрцитивной силы, магнитной проницаемости и потерь на вихревые токи и гистерезис. *Старение на переменном токе* принято характеризовать *коэффициентом старения*:

$$k_p = [(p_1 - p_0)/p_0]\cdot 100\%,$$

где p_1 и p_0 — удельные потери после и до старения.

При испытании на старение ферромагнитный материал подвергают искусственному старению, которое состоит в нагревании в течение 120 ч при температуре 120 °C (по ГОСТ 21427.1 — 75 — 21427.2 — 83 для электротехнических сталей с содержанием кремния до 3,8%) и в течение 120 ч при температуре 150 °C (по ГОСТ 21427.3 — 75 для сталей с содержанием кремния более 3,8%).

Глава 2

МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ

Все ферромагнитные материалы отличаются друг от друга по многим параметрам, основными из которых являются коэрцитивная сила, остаточная магнитная индукция, магнитная индукция насыщения, максимальная и начальная магнитные проницаемости, удельные активные и реактивные потери на перемагничивание,

удельные активное и реактивное магнитные сопротивления и другие параметры, о которых мы не говорили. По значению коэрцитивной силы все ферромагнитные материалы делятся на два больших класса: магнитотвердые (у них $H_c > 4000$ А/м) и магнитомягкие ($H_c < 4000$ А/м). Магнитотвердые материалы используются для изготовления постоянных магнитов, магнитомягкие — для изготовления магнитопроводов магнитных систем электрических аппаратов, машин и приборов. В зависимости от основных параметров (H_c, B_s, μ_m, $\mu_н$ и др.) магнитомягкие материалы можно разбить на несколько групп. Рассмотрим каждую из них.

2.1. Низкоуглеродистые электротехнические стали

Углеродистая сталь — это деформируемый ковкий сплав железа с углеродом (менее 2%) и некоторыми, входящими в него в зависимости от способа изготовления, примесями (марганцем, кремнием, серой, фосфором и др.). *Легированная сталь* — сплав, имеющий, помимо компонентов углеродистой стали, специально вводимые легирующие элементы (никель, кобальт, хром и др.) или повышенное содержание примесей, присутствующих в углеродистой стали (например, кремния более 0,3%). *Низкоуглеродистыми* принято называть стали с содержанием углерода не более 0,04%. Содержание других, кроме железа, элементов в низкоуглеродистой электротехнической стали столь мало, что она может быть названа также технически чистым железом. Впервые промышленное производство технически чистого железа для электротехнической промышленности наладила американская фирма «American Rolling Mill Company» (американская компания по прокату стали). По первым буквам названия фирмы этот материал получил название «армко».

В Российской Федерации низкоуглеродистые электротехнические стали, идущие для изготовления магнитопроводов электрических аппаратов, машин и приборов, производятся в соответствии с ГОСТ 3836 — 83 «Сталь электротехническая нелегированная, тонколистовая и ленты» (углерода до 0,04%) и ГОСТ 11036 — 75 «Сталь сортовая электротехническая нелегированная» (углерода до 0,035%). Стали по этим ГОСТ, используемые в основном на постоянном токе, называются нелегированными потому, что кремния допускается в них в количестве не более 0,3%, в отличие от легированных электротехнических сталей, применяемых в основном на переменном токе. В последних кремния >0,3%. Марка стали по ГОСТ 3836 — 83 обозначается пятизначным числом. Первый знак — класс по структурному состоянию и виду проката.

Таблица 2.1. Магнитные свойства тонколистовой нелегированной электротехнической стали по ГОСТ 3836 — 83

Марки стали	Коэрцитивная сила, А/м, не более	Максимальная магнитная проницаемость		Магнитная индукция при напряженности магнитного поля, А/м (Тл)					
		мГн/м	Гс/э	500	1000	2500	5000	10000	30000
		не менее							
10895 20895 11895 21895	95,0	3,8	3000	1,38	1,50	1,62	1,71	1,81	2,05
10880 20880 11880 21880	80,0	5,0	4000						
10864 20864 11860 21860	64,0	5,6	4500						
10848 20848 11848 21848	48,0	6,0	4800						
10832 20832 11832 21832	32	6,3	5000						

Цифра 1 означает, что сталь горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная. (Изотропным называется материал, магнитные свойства которого практически одинаковы в любом направлении по отношению к направлению проката.) Второй знак нормирует содержание кремния в стали и коэффициент старения. Вторая цифра 0 означает, что сталь нелегированная (содержит кремния до 0,3%) и что коэффициент старения ее не нормирован; вторая цифра 1 означает, что сталь тоже нелегированная, но коэффициент старения ее нормируется (не должен быть более 10%). Третий знак — группа по основной нормируемой характеристике. Третья цифра 8 означает, что сталь нормируется по значению коэрцитивной силы. Четвертая и пятая цифры — значение коэрцитивной силы в А/м. Например, сталь марки 10895 по ГОСТ 3836 — 83 — горячекатаная изотропная (первая цифра 1); коэффициент ее старения не нормируется, содержание кремния — до 0,3% (вторая цифра 0); нормируется коэрцитивная сила (третья цифра 8); значение коэрцитивной силы равно 95 А/м (четвертая и пятая цифры 95). Кроме углерода и кремния, в стали по ГОСТ 3836 — 83 допускается еще марганец в количестве не более 0,3%.

Магнитные свойства стали, определенные на контрольных, термически обработанных образцах, должны соответствовать нормам,

указанным в табл. 2.1 (для сталей с коэрцитивной силой $H_c \leqslant 60$ А/м — для толщин 0,1 — 3,9 мм; для сталей с $H_c > 60$ А/м — для толщин 0,7 — 3,9 мм).

Листовая горячекатаная сталь изготовляется толщиной 2,0 — 3,9 мм, холоднокатаная — толщиной 0,5 — 3,9 мм и шириной 500 — 1250 мм. Горячекатаную сталь изготовляют в листах, холоднокатаную — в листах и рулонах. По форме, размерам и предельным отклонениям листы и рулоны должны соответствовать ГОСТ 19903 — 74 и ГОСТ 19904 — 90. Холоднокатаную ленту изготовляют толщиной 0,1 — 2,0 мм. Размеры и предельные отклонения — по ГОСТ 503 — 81. Резаную ленту изготовляют толщиной 0,5 — 3,0 мм. Форма, размеры и предельные отклонения должны соответствовать ГОСТ 19851 — 74.

Таблица 2.2. Магнитные свойства стали сортовой электротехнической нелегированной по ГОСТ 11036 — 75

Марка стали		Коэрцитивная сила в разомкнутой цепи, не более		Магнитная индукция при напряженности магнитного поля, А/м, в замкнутой цепи, Тл, не менее		
ГОСТ 11036 — 75	ГОСТ 11036 — 64	А/м	Э	500	1000	2500
10895 20895 11895 21895	Э12	95,0	1,2	1,32	1,45	1,54
10880 20880 11880 21880	Э10	80,0	1,0	1,36	1,47	1,57
10864 20864 11864 21864	Э8	64,0	0,8	1,40	1,50	1,60

ГОСТ 3836 — 83 введен взамен ГОСТ 3836 — 73, а последний — взамен ГОСТ 3836 — 47, по которому низкоуглеродистая сталь с коэрцитивной силой $H_c = 95$ А/м обозначалась буквой Э, с $H_c = 80$ А/м — буквами ЭА, с $H_c = 64$ А/м — буквами ЭАА. Таким образом, сталь марки Э по ГОСТ 3836 — 47 примерно соответствует сталям марок 10895, 11895, 20895 и 21895 по ГОСТ 3836 — 83; ЭА — сталям 10880, 11880, 20880 и 21880; ЭАА — сталям 10864, 11864, 20864, 21864. ГОСТ 3836 — 73 содержит три марки стали (10848, 20848 и 20832), отсутствовавшие в ГОСТ 3836 — 47 и имеющие лучшие показатели, а в ГОСТ 3836 — 83 (табл. 2.1) введены еще и стали с нормированным коэффициентом старения (вторая цифра 1), отсутствовавшие в ГОСТ 3836 — 73.

Для сердечников и магнитопроводов электрических аппаратов и приборов низкоуглеродистая сталь выпускается по ГОСТ 11036 — 75 «Сталь сортовая электротехническая нелегированная» в виде цилиндров и полос. Маркировка этих сталей аналогична маркировке по ГОСТ 3836 — 83. Небольшое отличие имеется в значении первой цифры. Первая цифра 1 по ГОСТ 11036 — 75 означает сталь горячекатаную и кованую, цифра 2 — калиброванную.

В зависимости от назначения горячекатаная и кованая сталь делится на подгруппы: а — для горячей обработки давлением, б — для механической обработки (точения, строгания и т. д.) по всей поверхности. Сортамент, форма и размеры стали должны соответствовать требованиям следующих стандартов: горячекатаной — ГОСТ 2590 — 88, ГОСТ 2591 — 88 и ГОСТ 4405 — 75; кованой — ГОСТ 1133 — 71 и ГОСТ 4405 — 75; калиброванной — ГОСТ 7417 — 75. Магнитные свойства стали, определенные на термически обработанных образцах, должны соответствовать нормам, указанным в табл. 2.2.

На рис. 2.1 приведены основные кривые намагничивания низкоуглеродистых электротехнических сталей, гарантированные ГОСТ 3836 — 83 и ГОСТ 11036 — 75 (построены по данным табл. 2.1 и 2.2). Кривые получены при испытании термически обработанных, не подвергнутых старению образцов.

Все виды пластической деформации (растяжение, изгиб, резка, штамповка, глубокая вытяжка и т. д.) резко снижают необходимые для практики магнитные свойства низкоуглеродистых электротехнических сталей. Последние формируются в результате специальной термической обработки, которая мало похожа на термообработку инструментальных и конструкционных сталей. Термообработка сталей по ГОСТ 3836 — 83 и ГОСТ 11036 — 75 проводится в следующем режиме: отжиг без доступа воздуха до температуры не выше 950 °С, время охлаждения до 600 °С — не более 10 ч, далее — на воздухе. Высокотемпературный отжиг снимает внутренние механические напряжения, которые возникли в деформированном слое.

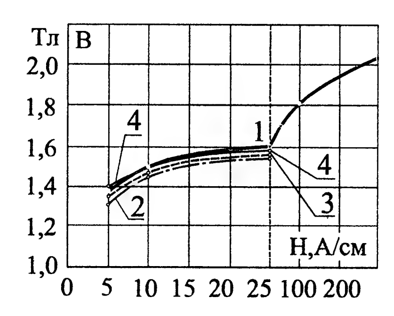


Рис. 2.1. Кривые намагничивания низкоуглеродистых сталей, гарантированные стандартами:
1 — для всех сталей по ГОСТ 3836 — 83; *2*, *3* и *4* — для сталей по ГОСТ 11036 — 75: *2* — марок 10895, 20895, 11895, 21895; *3* — марок 10880, 20880, 11880, 21880; *4* — марок 10864, 20864, 11864, 21864

Степень ухудшения магнитных свойств в результате механической обработки тем выше, чем больше отношение площади поверхности изделия, подвергнутой пластической деформации, к объ-

ему этого изделия. Если механическая обработка небольшая, то целесообразно предусматривать высокотемпературный отжиг на заводах-поставщиках и полученные после механической обработки изделия либо использовать без отжига, либо подвергнуть низкотемпературному отпуску, частично восстанавливающему магнитные свойства. Целесообразность выполнения высокотемпературного отжига у поставщика или у потребителя определяется для каждого конкретного вида изделия на основании технико-экономических соображений.

Таблица 2.3. **Магнитные свойства железа высокой степени очистки**

Материал	Содержание примесей, %		Коэрцитивная сила	Относительная магнитная проницаемость	
	углерод	кислород	А/м	начальная	максимальная
Технически чистое железо	0,02	0,6	64	250	7000
Электролитическое железо	0,02	0,01	28	600	15000
Карбонильное железо	0,005	0,005	6,4	3300	21000
Электролитическое железо, переплавленное в вакууме	0,01	—	7,2	—	61000
Железо, обработанное в водороде	0,005	0,003	3,2	6000	200000
Железо, обработанное в водороде особо тщательно	—	—	2,4	20000	340000
Монокристалл чистейшего железа, отожженный в водороде особо тщательно	—	—	0,8	—	1430000

Отжиг в среде влажного защитного газа является эффективным средством уменьшения старения низкоуглеродистых сталей. Другой метод уменьшения старения — легирование этих сталей или алюминием, или кремнием, или титаном.

С помощью специальной обработки, прежде всего позволяющей уменьшить содержание примесей, магнитные свойства технически чистого железа могут быть сильно улучшены. Основные свойства получающихся при этом материалов приведены в табл. 2.3 [14].

У нас в стране электролитическое железо производится по ТУ 14-1-1722 — 76; карбонильное — по ТУ 14-1-1720 — 76. Используются они, главным образом, в качестве шихтового материала. Изделия определенной формы получаются из них либо методами порошковой металлургии, либо стандартными металлургическими методами после спекания и выплавки предпочтительно в вакуумных печах.

Следует отметить, что материалы, приведенные в табл. 2.3, вследствие своей высокой стоимости и сложности получения не нашли еще широкого применения в электроаппаратостроении.

Уменьшение примесей приводит не только к уменьшению коэрцитивной силы и увеличению максимальной магнитной проницаемости, но также и к небольшому росту магнитной индукции насыщения.

2.2. Конструкционные материалы, применяемые для магнитопроводов

Конструкционные стали и чугуны применяются в производстве электрических аппаратов по двум причинам:

сочетание определенных механических и магнитных свойств позволяет при их использовании одновременно выполнить две функции (одна и та же деталь может быть и магнитопроводом, и основой конструкции, к которой крепятся остальные части аппарата);

относительная дешевизна конструкционных сталей и чугунов делает их применение вместо низкоуглеродистых электротехнических сталей во многих случаях экономически целесообразным.

К материалам этой группы можно отнести: конструкционные легированные стали (качественные, высококачественные и обыкновенного качества); конструкционные углеродистые стали (качественные и обыкновенного качества); инструментальные углеродистые стали и пружинные стали; стальное литье; серый и ковкий чугун. Все эти материалы не предназначены специально для магнитопроводов, стандарты на них не содержат гарантированных магнитных свойств. Магнитные свойства конструкционных материалов могут колебаться в зависимости от состава, технологии изготовления, термообработки и других факторов в более широких пределах, чем магнитные свойства электротехнических сталей.

Отжиг после механической обработки, если он не противоречит требованиям к механической прочности конструкции, как правило, улучшает их магнитные характеристики.

Конструкционные легированные качественные, высококачественные и обычного качества стали, выпускаемые отечественной промышленностью и пригодные для использования в качестве магнитопроводов электрических аппаратов, могут быть найдены по следующим Государственным стандартам.

ГОСТ 4543 — 71 «Сталь легированная конструкционная. Марки и технические требования»;

ГОСТ 11268 — 76 «Сталь тонколистовая конструкционная легированная высококачественная специального назначения» (на толщину до 3,9 мм);

ГОСТ 11269 — 76 «Сталь толстолистовая и широкополосная универсальная конструкционная, легированная высококачественная специального назначения» (на толщину более 3,9 мм: горячекатаная — 4 — 60 мм, холоднокатаная — 4 — 5 мм, широкополосная — 6 — 40 мм, для холодной штамповки — 4 — 10 мм).

Маркировка сталей по ГОСТ 4543 — 71, 11268 — 76 и 11269 — 76 содержит две цифры с большими буквами за ними. Цифры обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Буквы — легирующие добавки: Р — бор, Ю — алюминий, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Г — марганец, Н — никель, М — молибден, В — вольфрам. Цифры после буквы — примерное содержание легирующего элемента в процентах. Отсутствие цифр означает содержание элемента до 1,5%. Буква А в конце указывает на высококачественную сталь, буква Ш в конце обозначения через тире — особовысококачественную сталь.

Конструкционные легированные стали используются в основном в случаях, когда требуются особые механические свойства от элементов конструкции, являющихся одновременно и магнитопроводом.

Нелегированные углеродистые качественные и обычного качества конструкционные стали получили большее распространение в электроаппаратостроении, чем легированные конструкционные. Некоторые стали этой подгруппы (нелегированные) из-за относительно небольшого количества примесей обладают свойствами, вполне удовлетворительными для изготовления из них магнитопроводов электрических аппаратов. Стали этой подгруппы могут быть выбраны из сталей, выпускаемых по следующим Государственным стандартам: ГОСТ 1050 — 88 «Сталь углеродистая качественная конструкционная» (кованая и горячекатаная диаметром и толщиной до 250 мм, калиброванная и серебрянка); ГОСТ 1577 — 93 «Сталь горячекатаная толстолистовая качественная углеродистая и легированная конструкционная. Технические требования» (толстолистовая — толщиной 4 — 160 мм); ГОСТ 503 — 81 «Лента стальная холоднокатаная из низкоуглеродистой стали» (толщиной 0,05 — 3,9 мм); ГОСТ 14955 — 77 «Сталь качественная круглая со специальной отделкой поверхности» (диаметром 0,2 — 50 мм); ГОСТ 380 — 94 «Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки»; ГОСТ 14637 — 79 «Прокат толстолистовой и широкополосный универсальный из углеродистой стали общего назначения. Технические условия».

Маркировка качественных конструкционных сталей содержит две цифры, за которыми могут следовать строчные буквы; цифры означают среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента. Малые буквы указывают на технологию получения стали (степень раскисления): кп — кипящая, сп — спокойная, пс — полуспокойная. Так как увеличение содержания примесей, в первую очередь углерода, приводит к ухудшению магнитных свойств стали (уменьшению индукции насыщения, магнитной проницаемости и увеличению коэрцитивной силы), то для магнитопроводов электрических аппаратов, если нет дополнительных требований к механической прочности и др., следует использовать стали

с пониженным содержанием углерода, например, марок 05 (углерода менее 0,06%), 08 (углерода 0,05 — 0,11%), 10, 20, 30. Исследования показали, что сталь 08кп по параметрам кривой намагничивания близка к низкоуглеродистым сталям по ГОСТ 3836 — 83 с коэрцитивными силами 64 — 95 А/м.

Марки сталей углеродистых обыкновенного качества обозначаются по ГОСТ 380 — 94 одной цифрой (0 — 6), которая является условным номером стали в зависимости от ее состава и механических свойств. Перед цифрой — буквы Ст (сокращение слова «сталь»). За цифрой могут идти две малые буквы (индекс), отражающие технологию получения стали (кп, пс, сп).

Для магнитопроводов крупных электромагнитов, корпусов и других деталей электрических аппаратов нашло применение стальное литье по ГОСТ 977 — 88 «Отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали» (главным образом сталь 30 Л), чугун серый марок СЧ 21 — 40 и СЧ 12 — 28 и модифицированный магнитный марок СЧ 28 — 48 и СЧ 40 — 60 по ГОСТ 1412 — 85 и чугун ковкий марок КЧ 35 — 4 и КЧ 35 — 10 по ГОСТ 1215 — 79. Чугун — сплав железа с углеродом (более 2%), а также с кремнием, марганцем, серой и фосфором, с трудом поддающийся обработке давлением. Коэрцитивная сила ковкого чугуна с белой сердцевиной составляет 100 А/м, с черной — 120 А/м. Ковкий чугун обладает лучшими магнитными свойствами, чем серый.

Инструментальные и пружинные углеродистые стали используются для магнитопроводов электрических аппаратов в некоторых специальных случаях. Углеродистые стали марок У7А, У8А, У10А, У12А по ГОСТ 2283 — 79 «Лента стальная холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали» могут применяться для якорей силовых герконов, когда использование стали с присадкой кремния, никеля и других материалов, придающих необходимые в этом случае пружинящие свойства, является неэкономичным.

В некоторых случаях увеличение коэрцитивной силы до определенной величины является желаемым, например, в кодовых электромагнитных реле с магнитной памятью типа КДРЗМБ и КДРШЗМБ. Сердечники этих реле изготавливаются из стали У10А по ГОСТ 1435 — 90 «Сталь инструментальная углеродистая», по которому для сердечников выпускается также сталь У12А. Цифра в марке стали означает содержание углерода в сотых долях процента. Сталь У10А имеет коэрцитивную силу 2500 — 3500 А/м и остаточную индукцию 0,65 — 0,75 Тл.

2.3. Электротехнические стали, легированные кремнием

Добавка кремния в сталь в основном улучшает ее магнитные свойства: увеличивает активное электрическое сопротивление, что снижает вихревые токи, а значит, и потери на вихревые токи; уменьшает коэрцитивную силу; увеличивает магнитную индукцию в слабых и средних полях; снижает коэффициент старения. Из недостатков легирования кремнием наиболее существенными являются: уменьшение магнитной индукции в сильных магнитных полях и увеличение твердости и хрупкости.

Для магнитопроводов электрических аппаратов, приборов и машин, работающих на переменном токе, отечественная промышленность выпускает легированные кремнием стали по ГОСТ 21427.1 — 83 и ГОСТ 21427.2 — 83. По сообщению Информационного указателя стандартов (ИУС) № 9 за 1988 г., ГОСТ 21427.3 — 75 на горячекатаные стали (их марки начинаются с цифры 1) отменен в связи со снятием продукции с производства. Так как в существующей учебной и технической литературе по электрическим машинам и аппаратам горячекатаная изотропная сталь использовалась, здесь ее свойства тоже кратко рассматриваются. По сообщению ИУС № 8 за 1991 г., ГОСТ 21427.0 — 75 на классификацию и марки электротехнических тонколистовых легированных кремнием сталей отменен, но из-за отсутствия его замены им приходится пользоваться и в настоящее время.

Маркировка сталей по ГОСТ 21427.0 — 75 объясняется в п. 2.3 ч. I.

Таблица 2.4. **Соответствие марок тонколистовых электротехнических легированных сталей**

ГОСТ 21427.1 — 83	3311	3411	3412	3413	3414	3415	3404
ГОСТ 9925 — 61		Э310	Э320	Э330	Э330А		
ГОСТ 21427.1 — 83	3405	3406	3407	3408	3471	3472	
ГОСТ 9925 — 61							
ГОСТ 21427.2 — 83	2011	2012	2013	2014	2111	2112	2211
ГОСТ 9925 — 61							Э1300
ГОСТ 21427.2 — 83	2212	2311	2312	2411	2412	2413	2421
ГОСТ 9925 — 61				Э3100			
ГОСТ 21427.3 — 75	1211	1212	1213	1311	1312	1313	1411
ГОСТ 9925 — 61	Э11	Э12	Э13	Э21	Э22		Э31
ГОСТ 21427.3 — 75	1412	1413	1511	1512	1513	1514	1521
ГОСТ 9925 — 61	Э32	Э33	Э41	Э42	Э43	Э43А	Э44
ГОСТ 21427.3 — 75	1561	1562	1571	1572			
ГОСТ 9925 — 61	Э45	Э46	Э47	Э48			

В табл. 2.4 приведены марки сталей по ГОСТ 21427.3 — 75, 21427.1 — 83, 21427.2 — 83 и их соответствие обозначениям марок по ГОСТ 9925 — 61. Холоднокатаные анизотропные стали выпускаются по ГОСТ 21427.1 — 83 «Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая» толщиной 0,27; 0,3; 0,35; 0,5 и 0,8 мм в листах, рулонах и ленте и по ГОСТ 21427.4 — 78 «Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная» толщиной 0,05; 0,08; 0,15 и 0,20 мм. Соответствие марок этого стандарта маркам ГОСТ 9925 — 61 приведено в табл. 2.5.

Таблица 2.5. **Соответствие марок лент из холоднокатаных анизотропных легированных электротехнических сталей по ГОСТ 21427.4 — 78 и 9925 — 61**

ГОСТ 21427.4 — 78	3241				3422			3423		
ГОСТ 9925 — 61	Э310	Э340			Э350			Э360		
Толщина, мм	0,2	0,15	0,08	0,05	0,15	0,08	0,05	0,15	0,08	0,05

ГОСТ 21427.4 — 78	3424			3425			3411
ГОСТ 9925 — 61	Э360А		Э360	Э360АА			Э310
Толщина, мм	0,15	0,08	0,05	0,15	0,08	0,05	0,2

Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая выпускается по ГОСТ 21427.2 — 83 в виде рулонов, листов и лент толщиной 0,28; 0,35; 0,5 и 0,65 мм. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая выпускалась по ГОСТ 21427.3 — 75 в виде листов толщиной 0,1; 0,2 и 0,22; 0,35; 0,5; 0,65 и 1,0 мм. В стандартах на электротехнические стали имеются таблицы удельных потерь на вихревые токи и гистерезис (для двух или трех значений магнитной индукции) и значения магнитных индукций для нескольких значений напряженностей магнитного поля. К сожалению, эти последние соответствуют точкам кривой намагничивания, снятой на постоянном токе (по ГОСТ 12119 — 80). Для холоднокатаных сталей данные по кривым намагничивания соответствуют намагничиванию вдоль направления проката. Поперек направления проката магнитные свойства холоднокатаных анизотропных сталей существенно хуже, что должно быть учтено при разработке конструкции магнитопровода.

Координат точек кривых намагничивания, приведенных в ГОСТ 21427.1 — 83 и 21427.2 — 83 для расчета магнитных систем, работающих в большом диапазоне магнитных индукций, явно недостаточно. Поэтому приходится использовать литературные источники. Особенно мало данных, соответствующих точкам кривых намагничивания при магнитных индукциях, превышающих индукцию технического насыщения. В ГОСТ 21427.4 — 78 приводится довольно большое количество кривых намагничивания, снятых как на постоянном, так и на переменном токах при частотах 400, 1000 и 3000 Гц. Приводятся также и кривые удельных потерь в стали. Из-за логари-

фмического масштаба этих кривых их практическое использование затруднено.

Магнитные свойства холоднокатаных анизотропных сталей лучше свойств горячекатаных сталей аналогичного состава и той же толщины. Так, для холоднокатаной анизотропной стали 3411 толщиной 0,5 мм потери при частоте 50 Гц и магнитной индукции 1,5 Тл — $P_{1,5/50} \leqslant 2,45$ Вт/кг. Для горячекатаной стали 1411 такой же толщины эта цифра соответственно $P_{1,5/50} \leqslant 4,4$ Вт/кг. Аналогичное соотношение существует и для точек кривых намагничивания. Так, для той же холоднокатаной анизотропной стали при напряженности магнитного поля $H = 2500$ А/м магнитная индукция должна быть не менее 1,75 Тл, для горячекатаной стали 1411 — не менее 1,46 Тл (по кривым намагничивания на постоянном токе). Поэтому холоднокатаные анизотропные стали постепенно вытеснили горячекатаные.

Холоднокатаные изотропные стали по магнитным свойствам (табл. 2.6) занимают промежуточное положение между сталями первого и третьего классов. Так, для холоднокатаной изотропной стали 2411 толщиной 0,5 мм $P_{1,5/50} \leqslant 3,6$ Вт/кг и при напряженности магнитного поля 2500 А/м магнитная индукция — не менее 1,49 Тл.

Таблица 2.6. **Свойства холоднокатаных изотропных сталей**

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10000	30000
2011	0,65	3,8	9,0	1,48	1,6	1,7	1,8	2,02
	0,50	3,5	8,0	1,49	1,6	1,7	1,8	2,02
2012	0,65	3,6	8,0	1,5	1,62	1,72	1,82	2,02
	0,50	2,9	6,5	1,5	1,62	1,72	1,82	2,02
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2111	0,65	4,3	10,0	1,45	1,58	1,66	1,75	2,00
	0,50	3,5	8,0	1,46	1,58	1,67	1,78	2,00
2112	0,65	3,5	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02
	0,50	2,6	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2211	0,65	3,0	7,0	1,4	1,56	1,65	1,73	1,96
	0,50	2,6	5,8	1,4	1,56	1,65	1,76	2,00
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,6	1,68	1,77	2,00
2311	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52	1,62	1,72	1,96
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54	1,64	1,74	1,96
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,4	1,56	1,66	1,74	1,96
2411	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49	1,60	1,73	1,96
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50	1,60	1,70	1,95
2412	0,50	1,3	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Разница в значениях магнитной индукции при Н=2500 А/м вдоль и поперек направления проката для стали с содержанием кремния до 1,8% (вторые цифры марки стали — 0, 1 и 2) не должна превышать 0,13 Тл; свыше 1,8% (вторые цифры 3 и 4) — 0,16 Тл. По ГОСТ 21427.2 — 83 удельные потери проверяются при амплитуде магнитной индукции 1,5 Тл, магнитная индукция — при напряженности магнитного поля 2500 А/м. Магнитные свойства сталей, указанные в ГОСТ 21427.1 — 83, 21427.2 — 83 и 21427.4 — 78, определяются после отжига образцов.

В стандартах на тонколистовые электротехнические стали указаны коэффициенты заполнения стали (изменяются от 0,94 до 0,98 в зависимости от типа изоляционного покрытия) и коэффициенты старения (изменяются от 4 до 10%). Коэффициент старения уменьшается при увеличении содержания кремния в стали.

Большим недостатком сплавов железа с кремнием является их хрупкость и механическая твердость, увеличивающиеся по мере увеличения содержания кремния. В связи с этим в электрических аппаратах малых размеров использование высоколегированной стали затруднено. В стандартах указывается допустимое число перегибов для различных марок сталей.

ГОСТ 21427.4 — 78 «Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная» содержит не только таблицу удельных потерь и таблицу нескольких точек кривой намагничивания на постоянном токе, но и кривые удельных потерь и кривые намагничивания на переменном токе для частот 400, 1000 и 3000 Гц для некоторых марок сталей различной толщины. Ферромагнитные материалы ГОСТ 21427.4 — 78 используются в основном на повышенных частотах (400 Гц и более). Чем выше частота, тем более тонкую ленту следует выбирать.

Особо следует остановиться на технологических вопросах применения электротехнических тонколистовых сталей. По ГОСТ 21427.1 — 83 сталь поставляется в термически обработанном состоянии. По ГОСТ 21427.2 — 83 и 21427.4 — 78 сталь поставляют как в термически обработанном, так и в термически не обработанном состоянии. Магнитопроводы электрических аппаратов формируются либо из отдельных пластин, получаемых штамповкой или резкой, либо путем навивки из лент. Любая из этих операций связана с созданием внутренних механических напряжений, которые приводят к ухудшению магнитных свойств. В стандартах указаны свойства стали, подвергнутой отжигу после нарезки образцов. Для холоднокатаной анизотропной стали ГОСТ 21427.1 — 83 регламентирует такой режим отжига: нагрев при температуре 800 — 820 °С с выдержкой от 2,5 до 10 мин в атмосфере, предохраняющей от окисления, или с выдержкой 3 мин на воздухе. Для холоднокатаной изотропной стали марок 2011, 2012 и 2013 режим отжига по ГОСТ 21427.2 — 83: нагрев в защитной атмосфере при температуре

830±10 °С, выдержка 2 ч, охлаждение до 600 °С по 50 °С в час, далее — охлаждение с печью.

Возможны и другие режимы отжига, основная цель которого — восстановить совершенство кристаллической решетки металла. Относительное влияние внутренних напряжений увеличивается при уменьшении индукции и уменьшении размеров изготовляемого магнитопровода. Для пластин, ширина элементов которых больше 20 мм, ухудшение свойств незначительно и операция повторного отжига не является необходимой. Создание конструкций магнитопроводов путем автоматизированной навивки из ленточной и листовой стали, поставляемой в рулонах, позволяет исключить или свести к минимуму механическую обработку при изготовлении магнитопровода. Особенно выгодно в этом случае использовать холоднокатаную сталь с анизотропной структурой при совпадении направлений навивки и проката. К сожалению, для электромеханических аппаратов не характерны замкнутые магнитопроводы, поэтому витые магнитопроводы в таких аппаратах получили значительно меньшее распространение, чем в трансформаторах или в магнитных усилителях. Для электромеханических аппаратов с воздушными зазорами можно использовать витые разрезные сердечники.

Из-за сложности конструкций магнитопроводов из холоднокатаной анизотропной стали в электрических аппаратах широко используется холоднокатаная изотропная сталь.

Сборка магнитопроводов и шлифовка стыков должны сопровождаться минимальными деформациями металла. При сборке следует избегать концентрации стягивающих усилий, избегать крепления магнитопровода путем применения стягивающих болтов, шпилек, так как отверстия в магнитопроводе увеличивают магнитное сопротивление за счет уменьшения поперечного сечения. При стяжке магнитопровода его свойства ухудшаются еще и за счет концентрации механических напряжений. Следует стремиться к конструкциям, в которых крепление магнитопровода осуществляется за счет внешнего корпуса. Сильное ухудшение магнитных свойств магнитопроводов, собранных в пакет путем клепки, является следствием возникновения дополнительных потерь на вихревые токи, уменьшения поперечного сечения стали и концентрации механических напряжений в местах клепки. Потери на единицу веса в таких магнитопроводах бывают в 2,5 — 3 раза выше стандартных удельных потерь. При неграмотном проектировании эта цифра может доходить до 10. Учет влияния технологических и конструктивных особенностей магнитопровода на активную и реактивную составляющие намагничивающего тока достаточно хорошо разработан при расчете и проектировании трансформаторов [11] и в гораздо меньшей степени — при расчете электрических аппаратов.

2.4. Прецизионные магнитомягкие материалы

Ферромагнитные материалы этой группы выпускаются по ГОСТ 10160 — 75 «Сплавы прецизионные магнитно-мягкие». Маркируются они по ГОСТ 10994 — 74 «Сплавы прецизионные. Марки». В соответствии с этим стандартом наименование марки сплава состоит из буквенных обозначений основных элементов, входящих в сплав, и двузначного числа перед буквой, равного процентному содержанию элемента в сплаве. Этот элемент составляет наряду с железом основу сплава. Принято следующее обозначение элементов: Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, К — кобальт, Л — бериллий, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ю — алюминий, Х — хром, Ф — ванадий. Буква А означает, что сплав изготавливается с суженными пределами химсостава. Углерода в прецизионных магнитомягких сплавах содержится 0,03 — 0,05%, кремния — 0,15 — 0,3% (в большинстве сплавов).

Например, материал 80НХС представляет собой сплав 80% никеля с железом при небольших добавках хрома и кремния. Химический состав сплавов регламентируется ГОСТ 10994 — 74 и ГОСТ ВД 10994 — 74 (последний — для 81НМА). Сплавы железа с никелем называются пермаллоями.

Группы и марки прецизионных магнитомягких сплавов, изготовляемых по ГОСТ 10160 — 75 в зависимости от их основных свойств приведены в табл. 2.7.

По ГОСТ 10160 — 75 материалы выпускаются трех классов в зависимости от уровня их магнитных свойств: I класс — с нормальными магнитными свойствами, II класс — с повышенными магнитными свойствами, III класс — с высокими магнитными свойствами. Эти свойства обеспечиваются разной технологией получения: материалы I класса получаются методом открытой выплавки, II — выплавкой в вакуумных печах или методом отбора, III — специальными методами выплавки. Магнитные свойства материалов разного класса одного и того же состава могут сильно отличаться друг от друга. Например, для холоднокатаной ленты из 50Н толщиной 0,05 мм I класса максимальная проницаемость (относительная) $\mu_{rm} \geqslant 20000$, начальная $\mu_{rн} \geqslant 2000$, коэрцитивная сила $H_c \leqslant 20$ А/м; для того же сплава той же толщины, но III класса $\mu_{rm} \geqslant 60000$, $\mu_{rн} \geqslant 10000$, $H_c \leqslant 0{,}4$ А/м (в ГОСТ 10160 — 75 относительные магнитные проницаемости обозначены без буквы r в индексе). Отличие в магнитной индукции технического насыщения незначительное (1,5 Тл для I класса и 1,52 Тл для III). Под магнитной индукцией технического насыщения ГОСТ 10160 — 75 имеет в виду индукцию, измеренную в полях напряженностью 4000 — 4800 А/м для сплавов с 34 — 65% никеля и в полях с напряженностью 640 — 800 А/м для сплавов с 70 — 85% никеля.

Таблица 2.7. **Группы и марки прецизионных магнитомягких сплавов**

Группы	Марки	Основные свойства
1	79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях
2	50НХС	Высокая магнитная проницаемость и повышенное удельное электросопротивление
3	45Н, 50Н	Повышенная магнитная проницаемость и повышенная индукция технического насыщения
4	50НП, 68НМП, 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМП, 79НМП, 77НМДП, 65НП	Прямоугольная петля гистерезиса. Сплавы обладают анизотропией магнитных свойств
5	27КХ, 49КФ, 49К2Ф, 49К2ФА	Высокая магнитная индукция технического насыщения
6	47НК, 47НКХ, 64Н, 40НКМ	Низкая остаточная магнитная индукция и постоянство магнитной проницаемости. Сплавы обладают анизотропией магнитных свойств
7	79Н3М, 68НМ	Высокая магнитная проницаемость при однополярном намагничивании. Сплавы обладают анизотропией магнитных свойств
8	16Х, 36КНМ	Высокая коррозионная стойкость

Прецизионные сплавы изготовляют в виде холоднокатаных лент, холоднокатаных и горячекатаных листов, горячекатаных и кованых прутков и проволоки. Сортамент приведен в соответствующих таблицах ГОСТ 10160 — 75. В нем же приведены режимы термической обработки, основные физические константы и механические свойства сплавов, а также магнитные свойства сплавов в различных режимах намагничивания (статические и динамические кривые намагничивания, кривые магнитных проницаемостей, кривые удельных потерь).

Из железоникелевых сплавов, кроме материалов типа 45Н и 50Н (третьей группы), для магнитопроводов особо чувствительных электрических аппаратов используются железоникелевые сплавы, обладающие наивысшей магнитной проницаемостью (материалы первой группы), железоникелевые материалы с повышенным электросопротивлением (второй группы), железоникелевые материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (четвертой группы).

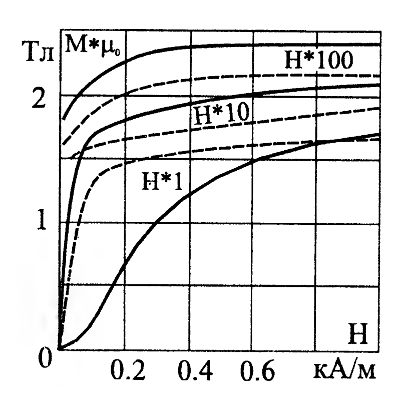
Материалы первой и третьей групп выпускаются в виде холоднокатаных лент и листов толщиной не более 2,5 мм, холоднокатаной проволоки, горячекатаных листов толщиной 3 — 22 мм и прутков диаметром 8 — 100 мм. Магнитные свойства горячекатаных листов и прутков (и те, и другие выпускаются только I класса) хуже, чем магнитные свойства холоднокатаных лент того же материала. Так, сплав первой группы 79НМ в виде прутков имеет максимальную магнитную проницаемость $\geqslant$80000, начальную

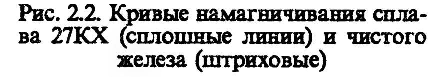
$\geqslant$20000, коэрцитивную силу $\leqslant$3,2 А/м, магнитную индукцию насыщения $\geqslant$0,75 Тл. Этот же сплав в виде ленты толщиной 0,35 мм III класса обладает максимальной магнитной проницаемостью $\geqslant$250000, начальной $\geqslant$35000, коэрцитивной силой $\leqslant$1 А/м. Коэрцитивные силы сплавов первой группы изменяются в пределах 0,4 — 8 А/м, т. е. на один-два порядка ниже коэрцитивных сил низкоуглеродистых электротехнических сталей по ГОСТ 4836 — 83 и ГОСТ 11036 — 75. Одним из недостатков сплавов первой группы является относительно низкое значение магнитной индукции технического насыщения. Для вышеприведенной ленты из 79НМ $B_s \geqslant 0,73$ Тл.

Сплав 50НХС второй группы для увеличения удельного электрического сопротивления легирован кремнием (буква С в марке). По своим магнитным свойствам он занимает промежуточное положение между сплавами 1-й и 3-й групп. Для холоднокатаных лент II класса толщиной 0,35 и 0,5 мм у сплава 50НХС максимальная магнитная проницаемость $\geqslant$35000, начальная $\geqslant$3000, коэрцитивная сила $\leqslant$10 А/м, магнитная индукция технического насыщения $\geqslant$1,0 Тл.

Материалы четвертой группы, обладающие петлей гистерезиса прямоугольной формы, имеют максимальные магнитные проницаемости даже большие, чем сплавы первой группы. Так, сплав 65НМП в виде холоднокатаных лент III класса толщиной 0,1 и 0,2 мм имеет максимальную магнитную проницаемость не менее 800000 при коэрцитивной силе меньше 1,6 А/м и магнитной индукции насыщения 1,15 Тл. Материалы четвертой группы обладают ярко выраженной анизотропией магнитных свойств, выпускаются только в виде холоднокатаных лент толщиной от 0,005 до 0,5 мм.

Особо следует сказать о некоторых технологических вопросах применения железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью (сплавов 1 — 4 групп табл. 2.7). Эти сплавы поставляют потребителю только в термически не обработанном состоянии. Магнитопровод из них изготавливается так же, как и из тонколистовой электротехнической кремнистой стали. Общие требования к термической обработке сплавов после изготовления магнитопроводов имеются в ГОСТ 10160 — 75. Исключительно высокие магнитные свойства эти сплавы имеют только после отжига, причем они значительно более чувствительны к воздействию механических напряжений и деформаций, чем электротехнические легированные кремнием стали. Так, наклеп, появляющийся при штамповке или токарной обработке отожженных железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью, понижает проницаемость и увеличивает коэрцитивную силу в десятки раз. Эти сплавы настолько чувствительны к механическим напряжениям, что нанесение обмоток непосредственно на сердечник нередко вызывает уменьшение




Рис. 2.2. Кривые намагничивания сплава 27КХ (сплошные линии) и чистого железа (штриховые)

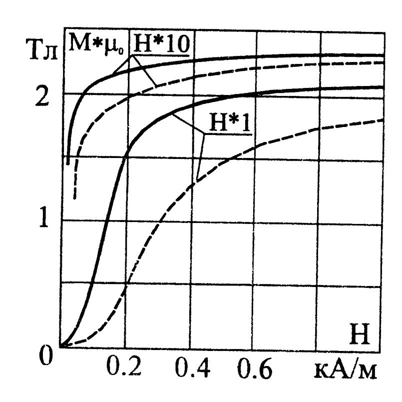


Рис. 2.3. Кривые намагничивания сплавов 49К2Ф: I класс (штриховые линии); II класс (сплошные линии)

начальной и максимальной проницаемостей в 3 — 4 раза по сравнению со значениями для сердечников в каркасах. Поэтому необходимо предусматривать специальные меры защиты от случайных и неизбежных механических воздействий путем применения защитных каркасов и амортизации. В этом состоит, пожалуй, один из основных недостатков железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью. Железоникелевые и железоникелькобальтовые сплавы по ГОСТ 10160 — 75 обладают удовлетворительными характеристиками механической обрабатываемости.

Материалы пятой группы с высокой магнитной индукцией насыщения позволяют габариты и вес магнитной системы сделать наименьшими. Ограничивает широкое использование этих материалов в электроаппаратостроении высокая стоимость кобальта, который является одним из основных, кроме железа, компонентов сплавов этой группы. ГОСТ 10160 — 75 не содержит данных по магнитным индукциям насыщения материалов этой группы, а дает только координаты одной-двух точек кривых намагничивания при напряженностях магнитного поля 400, 2500 и 15000 А/м. Так, для сплава 49К2ФА III класса в виде листов и лент толщиной 0,1 мм при напряженности магнитного поля 400 А/м магнитная индукция ⩾2,0 Тл, при напряженности 2500 А/м магнитная индукция ⩾2,2 Тл. Коэрцитивная сила этого сплава ⩽30 А/м; удельные потери при магнитной индукции 1,8 Тл и частоте 400 Гц — не более 25 Вт/кг, при магнитной индукции 2,0 Тл и той же частоте — не более 30 Вт/кг.

На рис. 2.2 и 2.3 приведены кривые намагничивания по намагниченности чистого железа и сплавов железа с кобальтом [13] (по осям ординат этих графиков отложено произведение намагниченности на магнитную постоянную).

Раздел второй

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ — НА MATHCAD

Документы MCAD настоящей работы самодостаточны. Как правило, они содержат не только расчеты чего-либо, но и объяснения этих расчетов, а также их теоретическое обоснование. Поэтому, приступая к изучению какого-либо вопроса, рассмотренного ниже в основной части книги, следует сначала познакомиться с материалом, имеющимся в документе MCAD в соответствующем приложении. Исключения из этого правила — документы MCAD по свойствам магнитных материалов (Приложения 1, 2, 3), теоретическая часть которых в основном сосредоточена в гл. 1, и документы MCAD по динамике тепловых процессов (Приложения 5 и 6), теоретическая часть которых сосредоточена в п. 4.1 основного текста. Перенос объяснений в п. 4.1 сделан для того, чтобы познакомить читателя с общим подходом к решению обыкновенных дифференциальных уравнений, которые используются далее во всех рабочих документах MCAD, рассматривающих переходные процессы в электрических аппаратах. В п. 4.1 описаны также некоторые характерные особенности MCAD.

Глава 3

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

В этой главе описано использование стандартных функций MCAD по интерполяции и экстраполяции сложных нелинейных характеристик, к которым можно отнести петли гистерезиса и кривые намагничивания магнитных материалов. Рассматривается также вопрос об использовании графических возможностей MCAD по изображению отрезков прямых линий в ортогональной системе координат для построения векторных диаграмм.

3.1. Аппроксимация кривых намагничивания и петель гистерезиса магнитных материалов

3.1.1. Кривая зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля (см. также документ **B(H).mcd** *— Приложение 1)*

Как известно, связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H по основной кривой намагничивания по индукции (см. кривую *1* на рис. 1.2 и 1.3) — нелинейна. Характер этой зависимости в значительной степени является функцией диапазона изменения напряженности магнитного поля. С этой точки зрения условно можно разбить всю кривую на несколько частей: вблизи начала осей координат ощутим некоторый рост индукции при увеличении напряженности магнитного поля; затем идет перегиб кривой B(H) (нижнее «колено»); в средней части при небольшом росте напряженности H индукция B сильно увеличивается (почти вертикальный подъем кривой B(H)); за ним опять следует перегиб (верхнее «колено»); в верхней части кривой при большом увеличении напряженности магнитная индукция возрастает незначительно. Такой сложный характер зависимости затрудняет представление всей кривой B(H) в аналитическом виде, а известные из литературы формулы либо дают значительные погрешности, либо получаются слишком сложными. Отсутствие аналитической формы записи кривой намагничивания материала магнитопровода делает в общем случае невозможным аналитический расчет магнитной цепи. На практике приходится для этого пользоваться численными методами, при которых проводится та или иная аппроксимация кривой B(H), заданной таблично или графически. В связи с бурным развитием ЭВМ в последние годы и особенно в связи с внедрением персональных компьютеров в учебный процесс и технику использование численных методов для аппроксимации кривой намагничивания материала существенно упростилось.

Покажем, как это можно сделать в MCAD на примере аппроксимации кривой намагничивания по индукции магнитомягкого материала (стали 10895).

На рис. 3.1 приведена такая кривая. Сплошная часть этой кривой (0PQ) известна из литературы и задана графически, штриховая (участок QM) достроена нами. При этом предполагалось, что точка Q примерно соответствует точке технического насыщения, поэтому $\Delta B = \mu_0 \cdot \Delta H$, где ΔB и ΔH — приращения магнитной индукции и напряженности магнитного поля при переходе по кривой намагничивания от Q к M (см. гл. 1).

Наша основная цель — получить функцию B(H), по которой можно было бы для любого положительного значения напряженности магнитного поля определить соответствующее ему значение

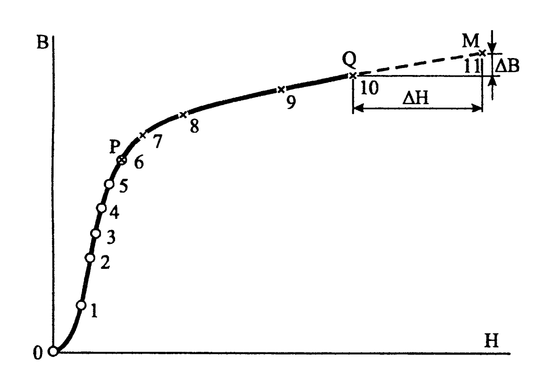


Рис. 3.1. Кривая намагничивания материала с опорными точками для аппроксимации

магнитной индукции. Фактически наличие такой функции равнозначно получению аналитической зависимости между B и H.

Для этого необходимо всю кривую узловыми точками разбить на участки, в промежутках между которыми кривая по тем или иным соображениям должна быть интерполирована, а при индукции, большей, чем индукция в точке M на рис. 3.1,— экстраполирована. В MCAD 6 можно соединять узловые точки прямыми линиями (линейная интерполяция) или отрезками кубических полиномов (кубическая сплайн-интерполяция). Последняя позволяет провести кривую через узловые точки так, чтобы первая и вторая производные кривой были бы непрерывны в каждой точке. Эта кривая образуется путем создания ряда кубических полиномов, проходящих через наборы из трех смежных точек. Кубические полиномы затем состыковываются друг с другом, образуя одну плавную кривую. Для оценки погрешности аппроксимации достаточно сопоставить значения магнитной индукции аппроксимируемой кривой в промежуточных точках, не совпадающих с опорными, со значениями магнитной индукции в тех же точках (при той же напряженности магнитного поля), рассчитанных по аппроксимирующей функции. Можно также оценить погрешность аппроксимации сравнением напряженности магнитного поля аппроксимируемой кривой и кривой, построенной по аппроксимирующей функции, для одинаковых значений магнитной индукции.

Самое простое решение вопроса — взять побольше точек и соединить их прямыми линиями. Для кривой намагничивания материала она описана в [10] и применялась в программах [2] на QB. Погрешность, вносимая такой интерполяцией, тем меньше, чем большим числом узловых точек заменяется кривая. При увеличении числа точек работа программы замедляется. Можно уменьшить число опорных точек при том же качестве интерполяции, если аппроксимировать кривую B(H) по участкам, соответствующим характеру этой зависимости: на начальном (начиная с точки, в которой H = 0, и кончая нижним «коленом» — до начала крутого участка с высокой магнитной проницаемостью) — сплайном; на

длине крутого участка — линейно; на участке верхнего «колена» — сплайнами; на участке выше верхнего «колена» — опять линейно. Ясно, что такую громоздкую аппроксимацию имеет смысл делать только в каких-то особых случаях. Мы упрощенно аппроксимировали кривую намагничивания материала до верхнего «колена» — сплайном, выше — линейно.

Сплайн-интерполяция кривой B(H) в местах ее перегиба при той же точности позволяет обойтись меньшим числом точек, чем линейная, но на QB и других универсальных алгоритмических языках программирования необходимо для этого писать специальную процедуру. MCAD позволяет эту интерполяцию осуществить с помощью встроенных в систему функций. Как это сделать, показано в рабочем документе B(H) (Приложение 1). Здесь же рассмотрим соображения, которыми следует руководствоваться при разбивке кривой B(H) на узловые точки:

— Будем считать, что десяти узловых точек, в число которых не входит нулевая, совпадающая с началом координат, и последняя, совпадающая с точкой M на рис. 3.1, достаточно для удовлетворительной интерполяции.

— Если магнитопровод не работает при малых значениях индукций, то точки в начале кривой можно расположить с меньшим шагом по индукции. Так, в таблице матрицы BH документа B(H) нулевая точка от первой, а также первая от второй отстоит по магнитной индукции на расстоянии 0,4 Тл.

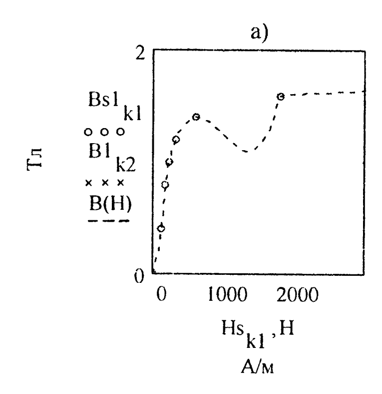
— Если магнитопровод работает при больших магнитных индукциях, то опорные точки в верхней части кривой намагничивания следует располагать с меньшим шагом по оси ординат. Так, расстояние по индукции между 9-й и 10-й точками в таблице матрицы BH Приложения 1 составляет 0,1 Тл.

— На большей части кривой намагничивания можно взять равномерный шаг по оси ординат (0,2 Тл в документе B(H)).

На рис. 3.1 соотношение длин отрезков между опорными точками по оси ординат примерно соответствует описанному. Масштаб же по оси абсцисс нарушен для того, чтобы можно было всю кривую показать на одном графике.

Различные способы интерполяции кривой B(H), которые мы проводили (включая не описанные здесь), и сравнение результатов с исходной характеристикой (при десяти опорных точках) позволяют сделать следующие выводы:

— Линейная интерполяция, при которой исходная кривая заменяется ломаной линией, дает удовлетворительные результаты, но ступенчатость получаемой при этом функции B(H) отражается на всех характеристиках, зависящих от B(H), например, на зависимости индуктивности обмотки электромагнита от времени при его включении.



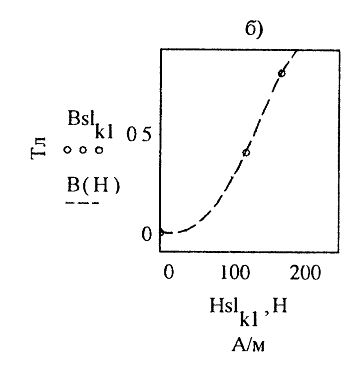


Рис. 3.2. Кривые намагничивания стали 10895, построенные по данным файла 10895.dat. До магнитной индукции 1,6 Тл проводилась сплайн-интерполяция с использованием функции cspline (*а*) или pspline (*б*), а при магнитных индукциях свыше 1,6 Тл — линейная интерполяция

— Изображение кривой B(H) путем одной сплайн-интерполяции (без линейной интерполяции) с функциями lspline, pspline и cspline дает неудовлетворительные результаты, особенно в области больших значений индукций. При этом наибольшие искажения — у cspline, наименьшие — у lspline.

— Наилучший результат дает смешанная аппроксимация, при которой вся кривая разбивается (точкой P на рис. 3.1) на две: первая на участке от точки 0 до точки P интерполируется кубическим сплайном, а вторая — как интерполируется от P до M, так и экстраполируется правее M — линейно.

— Точка P выбирается в месте относительно резкого изгиба кривой B(H). Этот выбор можно сделать и по таблице значений магнитных индукций и напряженностей магнитного поля (см. таблицу BH Приложения 1). Ниже строки 6 при том же изменении магнитной индукции (на 0,2 Тл) напряженность магнитного поля возрастает с существенно большим шагом (с 2000 до 7500, т. е. на 5500 А/м), чем убывает выше этой строки (с 2000 до 650, т. е. на 1350 А/м). Наиболее чувствительна к выбору этой точки функция cspline, наименее — lspline.

— На участке 0P кривой B(H), интерполируемом сплайном, наилучшие результаты получены при использовании функции lspline (см. рис. 1, 2, 3 и 4 Приложения 1), наихудшие — при cspline (см. искажения при индукциях от 1,4 Тл до 1,6 Тл на рис. 3.2, *а*), средние — при pspline (см. небольшое искажение при малых индукциях на рис. 3.2, *б*).

3.1.2. Кривые зависимости напряженности магнитного поля от магнитной индукции (см. также документ H(B) — *Приложение 2)*

При расчете магнитной цепи чаще приходится определять значение напряженности магнитного поля по известной магнитной индукции, поэтому аппроксимация зависимости H(B) представляет больший интерес, чем B(H). Эта аппроксимация сделана нами в рабочем документе H(B).mcd (Приложение 2). Часть его, общая с документом B(H), не приведена (она расположена между точечных строк).

Построение кривых H(B) аналогично построению кривых B(H), описанному в Приложении 1. Обозначения — те же.

Качество кривых намагничивания и кривых изменения магнитных проницаемостей от напряженности магнитного поля, построенных в документе B(H).mcd (Приложение 1), не вызывает особых сомнений, чего нельзя сказать о документе H(B).mcd. Нарушение плавности кривых зависимостей абсолютной и относительной магнитных проницаемостей (рис. 3 и 4 Приложения 2), а также кривой зависимости напряженности магнитного поля от индукции (рис. 2 там же) заставляют думать о некоторой погрешности интерполяции в районе индукции 1,2 Тл. Она может быть вызвана двумя причинами: недостаточной точностью исходных данных и малым количеством опорных точек.

На рис. 3.3, *б* и *в* показаны аналогичные кривые, построенные с помощью документа H(B).mcd для того же материала (стали 108995), но при использовании большего числа точек в исходном файле данных. Матрица BH значений координат этих

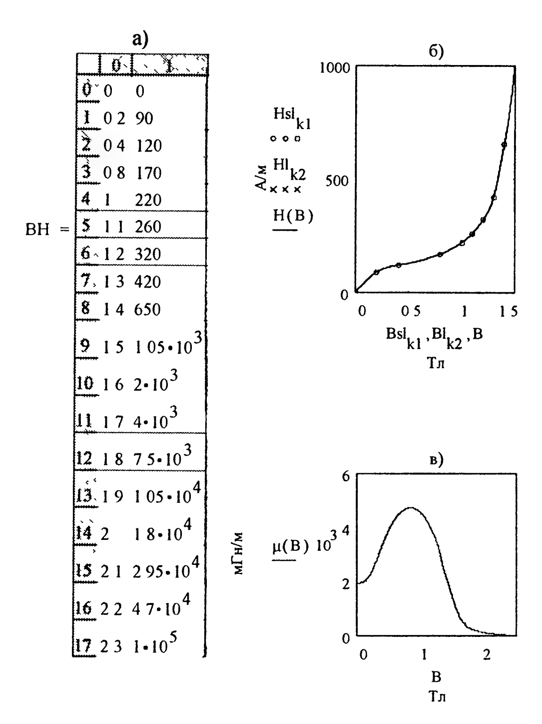


Рис. 3.3. Матрица координат кривой намагничивания стали 10895 файла bh95.dat (*а*), кривые зависимости напряженности магнитного поля (*б*) и магнитной проницаемости (*в*) от магнитной индукции, полученные при интерполяции данных этой матрицы при sp = 10, Bsl_{sp} = 1,6 Тл

точек приведена на рис. 3.3, *а*. Граница между сплайн- и линейной интерполяциями при получении кривых рис. 3.3, *б* и *в* была принята в точке с теми же координатами (B=1,6 Тл и H=2000 А/м), с которыми она была принята в Приложении 2. При этом порядковый номер точки перехода sp=10, тогда как в Приложении 2 sp=6. Как видно из рис. 3.3, *б* и *в*, кривые H(B) и μ(B) на них имеют более плавный вид. Сравнение рис. 3.3, *б* с рис. 2 Приложения 2, а также рис. 3.3, *в* с рис. 3 этого же приложения показывает, что увеличение числа опорных точек существенно влияет на качество интерполяции.

3.1.3. Симметричная петля гистерезиса магнитного материала (см. также документ H(B)LOOP.mcd *— Приложение 3)*

Аппроксимация симметричной петли гистерезиса магнитного материала в виде зависимости напряженности магнитного поля от магнитной индукции сделана нами в документе H(B) LOOP (Приложение 3) по данным динамической петли гистерезиса стали марки 1212 толщиной 0,5 мм на переменном токе частотой 50 Гц [12]. В п. 4.2.3 и документе DRLOOP (Приложение 9) именно эта кривая будет использована при анализе процессов, происходящих в цепи переменного тока с обмоткой на замкнутом магнитопроводе.

Рассмотрим сначала ввод данных.

На рис. 3.4, *а* изображена верхняя половина симметричной петли гистерезиса B(H) в том виде, в каком она обычно приводится в литературе. Так как нам необходимо ввести координаты точек петли H(B), а не B(H), то петлю B(H) следует преобразовать, пройдя через этапы, последовательно показанные на рис. 3.4. Сначала часть петли 0-1-2-3 на рис. 3.4, *а*, соответствующую отрицательным значениям напряженности магнитного поля, перенесем с поворотом на 180° вокруг центра координатной плоскости из второго квадранта в четвертый — получим рис. 3.4, *б*. Повернем рис. 3.4, *б* на 90° вокруг центра координатной плоскости против часовой стрелки — получим рис. 3.4, *в*. Повернем изображение на рис. 3.4, *в* относительно оси H на 180° — получим рис. 3.4, *г*. На рис. 3.4, как и на других рисунках п. 3.1.3, направления движения рабочей точки обозначены стрелками и надписями: u при намагничивании и d при размагничивании (от английских слов up и down). Для восходящей ветви петли гистерезиса в документе H(B)LOOP.mcd (Приложение 3) для получения плавной кривой оказалось достаточным ввести 12 точек (от 0-й до 11-й), а для нисходящей — 7 (от *0*-й до *6*-й). Номера этих точек выбраны возрастающими в порядке увеличения значений элементов в векторах Bu и Bd магнитных индукций (последнее является условием правильного применения функций interp при магнитной индукции в качестве последнего аргумента). На рис. 3.5 опорные точки на верхней половине петли H(B) показаны кружками и прямыми арабскими цифрами 0 — 11 над ними для восходящей

части петли, а также крестиками и курсивными арабскими цифрами *0 — 6* справа от них на нисходящей ветви петли. Рис. 3.5 фактически повторяет рис. 1 рабочего документа H(B)LOOP, дополняя его номерами точек и направлениями намагничивания u и размагничивания d. Заметим, что круглая точка 11 восходящей части петли совпадает с крестиком точки *6* нисходящей.

Особую сложность представляет ввод координат опорных точек восходящей ветви петли H(B), так как пользователь исходные данные вынужден обычно брать из петли B(H), изображенной на рис. 3.4, *а*. Эта последняя в большем масштабе повторена на рис. 3.6 с сохранением обозначений и номеров всех опорных точек рис. 3.5. Нетрудно видеть, что в исходной петле B(H) на рис. 3.6 точки 0-1-2-3 являются частью нисходящей ветви. Для лучшей ориентации в номерах точек векторы Bu и Hu выведены на с. 2 документа H(B)LOOP в виде таблиц с указанием номеров точек. По этим таблицам и векторам ввода точки 1, 2, 3 имеют следующие координаты: 0 (−0.88,0); 1 (−0.6,70); 2 (−0.3,110) и 3 (0,130). Напомним, что опорные точки восходящей ветви петли H(B) как на рис. 3.5, так и на рисунках рабочего документа показаны кружками, а нисходящей — крестиками.

На рис. 3.6 крестиками показаны и цифрами обозначены точки, которые соответствуют точкам нисходящей ветви петли H(B) рис. 3.5 с такими же номерами; кружками показаны и цифрами обозначены точки, которые соответствуют точкам восходящей ветви петли H(B) рис. 3.5 тоже с такими же номерами.

До сих пор речь шла о любой симметричной петле гистерезиса. Аппроксимация предельной петли будет тем точнее, чем до больших значений магнитных индукций и напряженностей магнитного

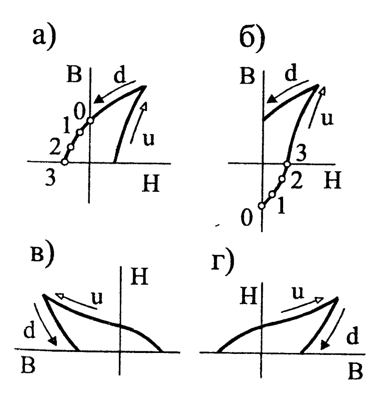


Рис. 3.4. Этапы преобразования симметричной петли гистерезиса от B (H) к H (B)

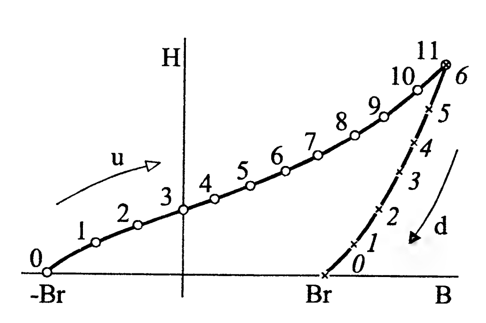


Рис. 3.5. Петля H (B) для напряженностей магнитного поля H > 0

поля известны ее координаты. Несколько слов скажем в связи с этим об особенностях ввода данных, если магнитная индукция, для которой мы хотели бы найти значение напряженности магнитного поля, больше магнитной индукции, при которой происходит техническое насыщение материала, или больше той, координаты которой нам известны. Для расчетов при таких магнитных индукциях необходимо ввести координаты точек предельной симметричной петли гистерезиса, включая общие для восходящей и нисходящей ветвей части. Такая петля $S_1M_2BrM_2'S_1'M_2'HcM_2S_1$ в координатах H(B) показана на рис. 3.7. Общими для восходящей и нисходящей ветвей являются участки M_2S_1 и $M_2'S_1'$. Их координаты необходимо вводить как в векторы Hu, Bu, так и в векторы Hd, Bd. Координаты точек S_1 и S_1', имеющие максимальные известные значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля, в рабочем документе H(B)LOOP обозначаются через Hm, Bm и −Hm, −Bm. Тогда для любой точки S_2 с магнитной индукцией B>Bm или S'_2 с магнитной индукцией B<−Bm по полученным в документе H(B)LOOP функциям Hup(B) и Hdn(B) можно рассчитать значение напряженности магнитного поля H. Это обеспечивают строки (3) и (7) для точки S_2 и (4), (8) для точки S_2'. Они аппроксимируют петлю прямыми S_1S_2 и $S_1'S_2'$, тангенс угла наклона которых к оси напряженностей магнитного поля равен магнитной постоянной μ_0 (с учетом масштабов H и B).

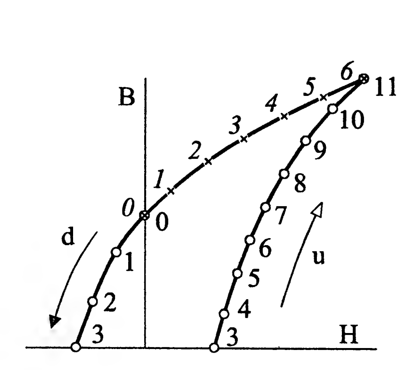


Рис. 3.6. Петля B(H) для индукций B>0

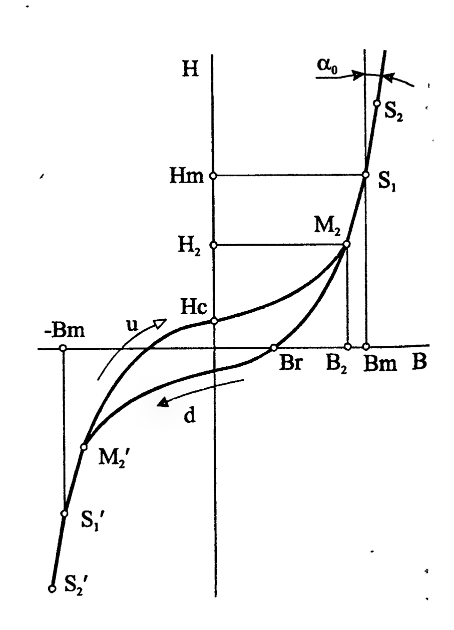


Рис. 3.7. Аппроксимация петли H(B)

3.2. Векторная диаграмма (см. также документ VD.mcd — Приложение 4)

В тексте п. 3.2, как и в рабочем документе VD.mcd (Приложение 4), термин «вектор» во избежание путаницы понятий используется только для обозначения направленного отрезка, а не для обозначения одномерного массива, как в других местах части III книги. Пример построения векторной диаграммы с помощью MCAD приведен в Приложении 4 (документ VD.mcd). В нем рассматривается электрическая цепь обмотки электромагнита без учета потерь в магнитопроводе. Фактически это векторная диаграмма напряжений и тока электрической цепи из последовательно соединенных активного R и реактивного X сопротивлений. Она состоит из вектора тока I и треугольника электрических напряжений со сторонами IR, IX и U (обозначения здесь и далее в п. 3.2 применяются такие же, как в рабочем документе VD).

MCAD не имеет специального средства построения векторных диаграмм и даже не имеет встроенного средства построения прямых линий со стрелками на концах, например, таких, как в графическом редакторе CorelDraw, или хотя бы таких, как в текстовом процессоре Word для Windows. Покажем, как приспособить для построения векторных диаграмм возможности MCAD по изображению линий на плоскости в прямоугольной системе координат. Для построения диаграммы из четырех векторов необходимо математически описать на декартовом графике двенадцать линий (к каждому из четырех векторов надо добавить по наконечнику стрелки, каждый из которых рисуется с помощью двух прямых отрезков). Все наконечники пусть будут одинаковой длины, которую зададим в долях опорного вектора. В документе VD опорным взят вектор IR, а длина проекции наконечников на направление вектора принята равной $0{,}1 \cdot IR$ (см. строку (3) Приложения 4). Будем считать также, что каждый наконечник состоит из двух прямых линий, отстоящих от вектора на угол, тангенс которого $tg\alpha = 0{,}1$ (см. строку (1) Приложения 4).

Рассмотрим формирование векторов и наконечников к ним. Объяснения будем сопровождать рис. 3.8 — 3.10 основного текста. Каждая прямая, которой посвящен рисунок, показана на них жирной линией с тремя точками-кружками, назначаемыми дискретной переменной. Так как MCAD на декартовом графике автоматически соединяет точки, координаты которых соответствуют текущим значениям дискретной переменной, прямыми линиями, то число этих точек в данном случае не имеет значения (выбрано три, а можно было выбрать две, десять, сто и т. п.), ибо прямые линии, соединяющие эти точки, все должны лежать на одной прямой, которую они и должны изображать. На рис. 3.8 — 3.10 показаны также оси x и y, образующие прямоугольную систему координат.

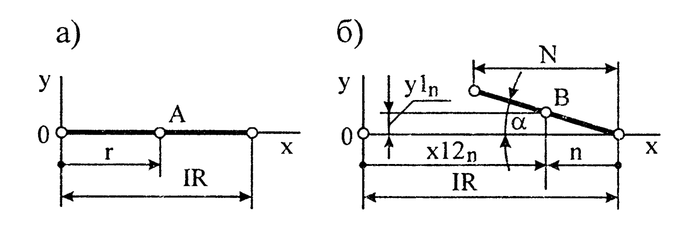


Рис. 3.8. Изображение точками вектора IR (*а*) и верхней линии его наконечника (*б*)

На рис. 3.8, *а* для точки А показано текущее значение дискретной переменной r (см. строку (2) Приложения 4), которая откладывается вдоль оси x. Ординаты y всех таких точек-кружков формируют вектор IR, который можно представить в виде изображения на декартовой плоскости константы, равной нулю. Вектор представляет собой прямую, соединяющую кружки на рис. 3.8, *а*.

Линия, образующая верхнюю часть наконечника стрелки вектора IR, показана на рис. 3.8, *б*. Длина этой части наконечника вдоль оси абсцисс равна $N=0{,}1\cdot IR$ (см. строку (3) Приложения 4). Дискретная переменная n для обозначения текущей длины этой части наконечника вводится в строке (4). Линию, образующую верхнюю часть наконечника стрелки вектора IR, можно сформировать из точек, каждая из которых строится с помощью двух одномерных массивов: первый — значения ординат, второй — значения абсцисс этих точек. На рис. 3.8, *б* показана одна из таких точек B, ее координаты: $x12_n = IR - n$ и $y1_n = n\cdot tg\alpha$. Индекс n в этих формулах означает дискретную переменную, разные значения которой формируют разные значения координат текущей точки B. Нижняя часть наконечника стрелки вектора IR формируется аналогичным образом. Причем абсцисса $x12_n$ выражается по той же формуле, ордината $y2_n = -y1_n = -n\cdot tg\alpha$. Переменным $y1_n$, $x12_n$ и $y2_n$ присваиваются вышеуказанные значения в строке (5) Приложения 4.

Элементы построения вектора напряжения IX на индуктивном сопротивлении обмотки показаны на рис. 3.9, *а*; левой части его наконечника — на рис. 3.9, *б*; вектора напряжения U — на рис. 3.10, *а*; левой верхней части его наконечника — на рис. 3.10, *б*.

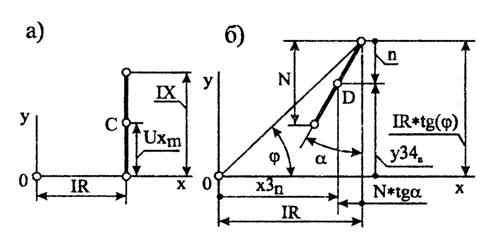


Рис. 3.9. Изображение точками вектора IX (*а*) и левой линии его наконечника (*б*)

Следует обратить внимание на то, что в формулах координат $x5_n$ и $y5_n$ (см. строку (8) Приложения 4) текущей точки

F левой верхней части наконечника вектора U, как и в формулах координат $x6_n$ и $y6_n$ правой нижней части наконечника стрелки, не показанных на рис. 3.10, *б*, используется не сам вектор U, а его модуль mU. Вектор U в документе VD считается комплексным числом. Изображение вектора тока I аналогично изображению вектора IR.

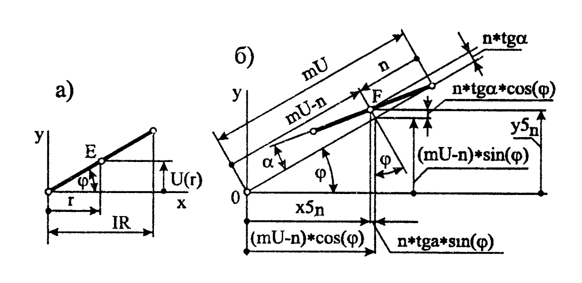


Рис. 3.10. Изображение точками вектора U (*а*) и верхней левой линии его наконечника (*б*)

Следующий важный этап — процесс доводки векторной диаграммы.

Во избежание искажения углов между векторами необходимо сделать так, чтобы масштабы по осям координат, по которым откладываются одинаковые по физическому смыслу величины, в нашем случае напряжения, были одинаковыми. Реально это означает, что пользователь должен обеспечить квадратную сетку на графике. Объясним, как этого можно добиться (все указания далее соответствуют работе в системе MCAD версии 8.0, в которой записан рабочий документ VD; приемы работы в MCAD 6.0 Plus аналогичны, но все-таки несколько отличаются от описанных ниже).

По умолчанию, MCAD сам выбирает диапазоны значений, откладываемых по осям координат, и строит рисунок минимальных размеров. График, который при этом будет построен, в общем случае не даст квадратную сетку. Наша диаграмма при первом ее появлении в документе оказалась вытянутой по вертикали. Убедимся в том, что указатель мыши имеет вид стрелки и находится где-то за пределами рисунка. Перемещая мышь по коврику, «протащим» ее указатель в область рисунка: вокруг диаграммы возникнет штриховой прямоугольник, который после отпускания левой кнопки мыши превратится в прямоугольник из сплошных линий с тремя маленькими черными квадратиками в правом нижнем углу и по центрам правой вертикальной и нижней горизонтальной сторон огибающего диаграмму прямоугольника. Указатель опять превратится в стрелку. Такого же эффекта можно добиться также, если при указателе, находящемся в пределах графика, нажать и отпустить левую кнопку мыши. Не нажимая кнопки, переместим указатель мыши до линий огибающего рисунок прямоугольника. Перемещение мыши следует остановить, как только ее указатель в виде стрелки превратится в черную кисть руки человека. Если теперь,

нажав левую кнопку, перемещать мышь, то вместе с прямоугольником будет перемещаться и диаграмма. Рядом с указателем мыши, который после нажатия левой кнопки снова превращается в стрелку, возникает маленький прямоугольник со сторонами из толстых серых линий. Прижмем диаграмму к левой границе экрана. Отпустим левую кнопку мыши: указатель вновь превратится в стрелку (или в изображение черной кисти руки человека). Переместим его к правому черному квадратику в центре вертикальной части прямоугольника, охватывающего диаграмму. Как только указатель превратится в горизонтальную двунаправленную черную тонкую стрелку, вновь нажмем левую кнопку мыши и, не отпуская ее, будем перемещать правую границу рисунка до правой границы листа документа. Последняя имеет вид сплошной вертикальной линии серого цвета. Отпустим левую кнопку мыши. MCAD тут же перестроит диаграмму в новом варианте — с другой шириной. Чтобы она уместилась на одном листе бумаги при печати принтером, необходимо следить за тем, чтобы ее правый край не вышел за пределы правой границы листа. Однако для уменьшения расстояния между сеткой диаграммы и правой границей рисунка сначала даже следует это сделать.

Диаграмма, построенная описанным образом, изображена на рис. 3.11. Несмотря на максимально возможное увеличение по ширине и минимально возможный размер по высоте, сетка графика образует не квадраты, а вытянутые по вертикали прямоугольники. Бросается в глаза большое число обозначений слева от оси ординат и под осью абсцисс (по двенадцати). Именно столь большое их количество слева от оси ординат не позволяет уменьшить физический размер рисунка по вертикали, несмотря на то, что насыщенность его весьма мала.

Для того чтобы график вписался в ширину листа формата А4, выбранного для оригинал-макета книги, пришлось даже размер шрифта Times New Roman, использованный для переменных и констант, при построении декартова графика уменьшить с 14, принятого для их изображения в большинстве документов MCAD книги, до 12. MCAD позволяет не показывать обозначения осей координат, однако таким путем уменьшить размеры рисунка не удается.

Если при указателе мыши, находящемся в границах графика, щелкнуть один раз левой кнопкой (при этом рисунок окружается прямоугольником из сплошных линий с тремя черными маленькими квадратиками в правом нижнем углу и по центрам правой вертикальной и нижней горизонтальной сторон) и изменить предельные значения вдоль оси ординат (увеличить максимальное или (и) уменьшить минимальное), то можно путем подбора этих значений построить диаграмму, в которой ячейки сетки образуют квадраты, как на рис. 1 Приложения 4. Для окончательной доводки

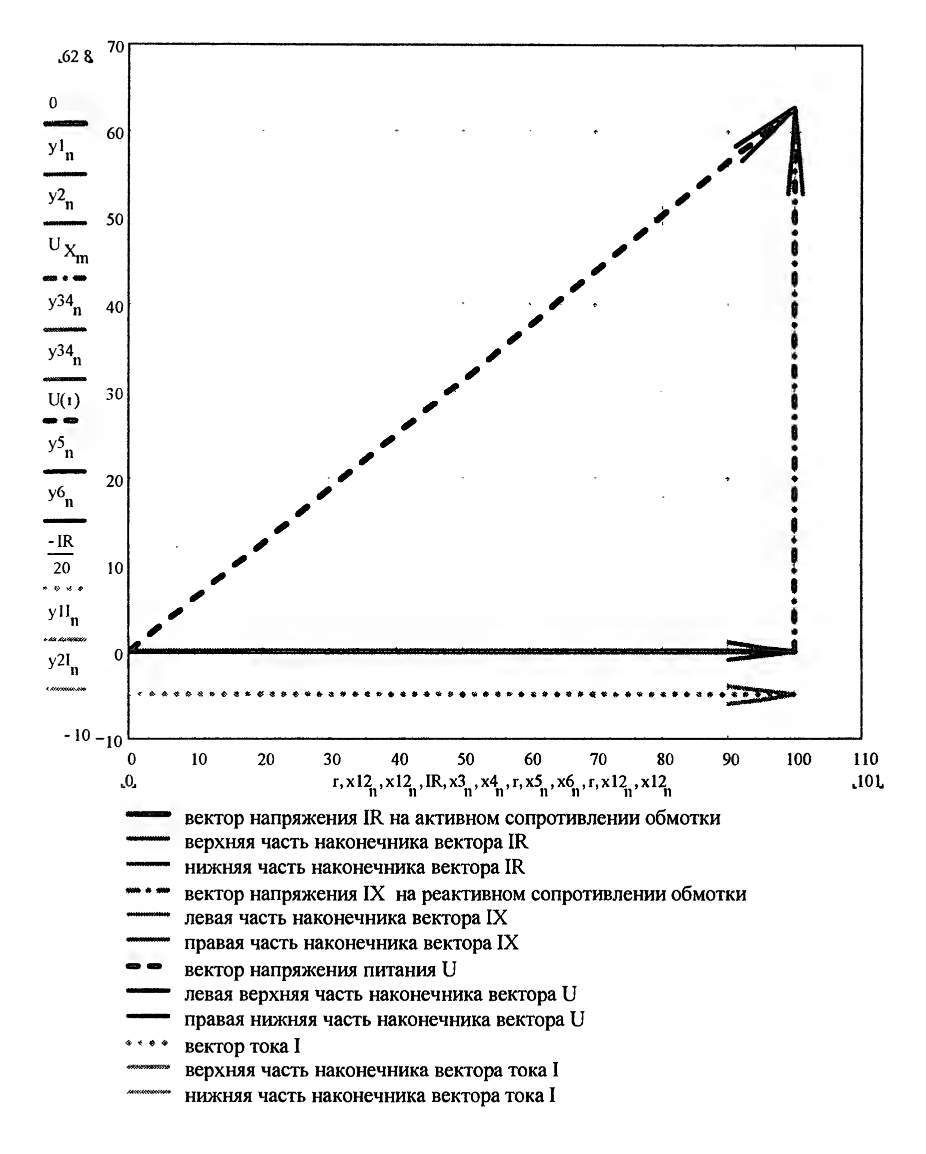


Рис. 3.11. Векторная диаграмма, построенная рабочим документом VD при масштабировании по умолчанию и последующем максимальном увеличении размера по горизонтали до ширины листа

можно также использовать и увеличение размера графика по вертикали, насколько позволяет формат листа А4. Изменение размера графика по вертикали делается путем «перетаскивания» с помощью мыши его нижней границы аналогично описанному уже «перетаскиванию» правой границы.

Рабочий документ VD показал, что построение векторной диаграммы в системе MCAD возможно, но, по-видимому, нельзя сказать, что это сделать просто и что это имеет смысл делать всегда при необходимости в таком построении. Для простого пользователя, не посвященного в премудрости MCAD, является также непонятной система обозначений осей координат, применяемая MCAD в случае, когда линия изображается с помощью двух одномерных массивов, элементы которых соответствуют значениям одной дискретной переменной. Таких линий на векторной диаграмме рабочего документа VD девять из двенадцати (обозначения их координат имеют индексы n и m на рис. 3.11).

Так как в прямоугольной системе координат MCAD позволяет строить только 10 линий на одном графике, если для каждой используется свой аргумент, и 16 функций от одного аргумента, то сложные векторные диаграммы на одном графике вообще нельзя отображать.

В настоящий момент приходится констатировать, что строить векторные диаграммы лучше и проще с использованием алгоритмических универсальных языков программирования, например как это сделано в [2] на QB.

Глава 4
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Рассматриваются переходные процессы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями первого порядка. Так как далее будем иметь в виду только такие дифференциальные уравнения, слово «обыкновенные» ниже не всегда пишется, хотя и подразумевается.

Если в этих уравнениях числовые коэффициенты не зависят от времени (уравнения линейны), то они решаются аналитически. Нелинейные дифференциальные уравнения, которые, главным образом, и характерны для электрических аппаратов, тоже могут быть решены, но численными методами, которые, как правило, требуют для их использования в универсальных алгоритмических языках специального программирования. Некоторые мощные системы программирования, рассчитанные на стационарные ЭВМ, имеют библиотеки универсальных подпрограмм, включающие и подпрограммы для численного решения обыкновенных нелинейных диф-

ференциальных уравнений [5]. Система программирования MCAD, рассчитанная на персональные компьютеры, начиная с версии 6.0 Plus, снабжена функциями, позволяющими решать нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения любого порядка и их системы без знания теории численных методов и без их программирования [3, 4]. В гл. 4 и Приложениях 5 — 11 настоящей работы показано, как это сделать, на примерах из теории электрических аппаратов, требующих решения одного дифференциального уравнения и системы из двух, а в гл. 5 и Приложении 14 — на примере, требующем решения системы из трех дифференциальных уравнений.

Исходные дифференциальные уравнения динамики процессов и объяснение их решения с помощью MCAD сосредоточено в п. 4.1, а в соответствующих ему Приложениях 5 и 6 комментарии сведены к минимуму. В п. 4.1 описан общий подход по использованию MCAD для решения любых обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, который используется в гл. 4 и 5.

Объяснение динамики процессов включения и отключения дросселя (п. 4.2, Приложения 7, 8, 9) и двухобмоточного воздушного трансформатора (п. 4.3, Приложения 10 и 11) даются в приложениях, а в основном тексте говорится лишь об особенностях рабочих документов всех этих приложений, делаются некоторые обобщения, описаны дополнительные исследования.

4.1. Динамика тепловых процессов

Рассмотрим нагрев проводника (обмотки электромагнита) во времени при неизменном токе, мощности и напряжении. Покажем, как расчеты этих режимов можно сделать на MCAD 6.0 Plus [3].

Исходное уравнение теплового баланса

$$P=k_T \cdot S \cdot \tau+c \cdot m \cdot d\tau/dt, \tag{4.1}$$

где P — мощность; k_T — удельный обобщенный коэффициент теплоотдачи; S — площадь поверхности теплоотдачи; τ — превышение температуры нагреваемого тела над температурой окружающей среды; c — удельная теплоемкость; m — масса; t — время. Мощность $P=I^2 \cdot R$; здесь I — ток.

Сопротивление обмотки

$$R=R_{20} \cdot (1+\alpha_{20} \cdot \tau), \tag{4.2}$$

где R_{20} и α_{20} — сопротивление и температурный коэффициент сопротивления материала провода обмотки при температуре окружающей среды (принята 20 °C).

Для обмоток электромагнитов при $10^{-4} < S < 10^{-2}$ м^2 известна [7] эмпирическая формула

$$k_T = 2,1 \cdot (1 + 0,005 \cdot \tau) \cdot S^{-1/3}. \quad (4.3)$$

Если учесть (4.2), (4.3) и привести (4.1) к нормальной форме, то для питания обмотки от источника с неизменным током I получим

$$d\tau/dt = -2,1 \cdot (1 + 0,005 \cdot \tau) \cdot S^{2/3} \tau/(c \cdot m) + I^2 R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \tau)/(c \cdot m). \quad (4.4)$$

Уравнение (4.4) — обыкновенное дифференциальное нелинейное первого порядка. Его можно решить каким-нибудь из известных численных методов. Однако на алгоритмических языках третьего поколения, используемых на персональных IBM-совместимых ЭВМ, например, на получившем широкое распространение QuickBASIC, необходимо программировать этапы этого численного метода. То же самое требовалось и при использовании MCAD всех версий до 6.0 включительно. Только начиная с версии 6.0 Plus у MCAD появились встроенные функции, позволяющие решать этот тип уравнений без знания численных методов их расчета. Покажем, как это делается. Сначала необходимо ввести числовые значения всех переменных (для τ вводится начальное τ_0 для момента времени $t = 0$) и присвоить значение правой части уравнения (4.4) при начальном τ некоторой функции, аргументами которой являются векторы независимой переменной t и искомой τ (термин «вектор» используется здесь в программистском смысле слова и означает одномерный массив). Для режима с неизменным током расчет обсуждаемого уравнения выполняют строки (1) — (3) рабочего документа TIPU.mcd (Приложение 5).

Обозначение := применяется в системе MCAD в качестве оператора присваивания. Для массивов, обозначенных латинскими буквами и арабскими цифрами, в Приложениях 5 и 6 и п. 4.1 используется полужирный шрифт. Индексы первого уровня индексов в этих строках (латинские буквы I для режима неизменного тока) вводятся в MCAD после нажатия точки на клавиатуре компьютера, по размерам практически не отличаются от размеров основного текста, но несколько сдвинуты в нижнюю часть строки. Кроме того, расстояние между этими индексами и основной частью имени переменной больше, чем обычное между двумя соседними буквами или цифрами. Описанные признаки первого уровня индексов в типографском наборе MCAD-документов, приведенных в приложениях, как правило, не соблюдаются. Индекс 0 (ноль) второго уровня индексов в выражении τ_{I_0} означает нулевой элемент вектора τ_I превышения температуры. Этот индекс вводится нажатием открывающей квадратной скобки. Как видим, он имеет меньшие размеры, чем индекс первого уровня. Z_I — матрица, в которой первый (с

номером 0) столбец (обозначается как $Z_I^{<0>}$) представляет собой значения моментов времени t_I, для которых определяются превышения температуры τ_I. Последний (второй) столбец матрицы Z_I обозначается через $Z_I^{<1>}$.

Матрица Z_I формируется функцией rkfixed. Ее второй (ноль) и третий (100·60) аргументы — граничные точки интервала времени в с, на длине которого ищутся значения τ_I; четвертый (100) — число точек, не считая нулевой, в которых ищутся решения. Значения второго, третьего и четвертого аргументов должны выбираться пользователем и приведены здесь для конкретного числового расчета при следующих исходных параметрах: $m=0{,}081$ кг; $R_{20}=247{,}202$ Ом; $I_{20}=0{,}19417$ А; $\alpha_{20}=0{,}0039$ $К^{-1}$; $S=0{,}00385$ $м^2$; $c=390$ Дж/(кг·К). Полученную матрицу Z_I можно вывести на экран монитора и с помощью вертикальной полосы прокрутки увидеть значения t_I и τ_I для любой из выбранных точек. Для режима неизменной мощности

$$P=P_{20}=R_{20}\cdot I_{20}^2 \tag{4.5}$$

основное расчетное уравнение, аналогичное (1) Приложения 5, приведено в строке (4), а для режима неизменного напряжения $U=U_{20}=I_{20}\cdot R_{20}$ — в строке (5) там же.

Построенные в MCAD на простом декартовом графике кривые зависимостей превышения температур от времени для трех рассматриваемых режимов нагрева показаны на рис. 1 Приложения 5. Перед построением кривых переменной t оператором t:=0..100 присваиваются значения целых чисел 0, 1, 2... до 100 включительно. Так как в каждой из трех матриц Z_I, Z_P и Z_U, полученных для рассматриваемых режимов, число точек равно 101 и так как каждая из них отстоит от соседней по времени на 60 с, то фактически ранжированная переменная t совпадает со временем в минутах.

При построении кривых в специальную область, расположенную ниже оси абсцисс, вводится дискретная переменная t, а в область слева от центра оси ординат — векторы τ_{It}, τ_{Pt}, τ_{Ut}. Индекс t второго уровня индексов величин, отложенных по оси ординат, должен совпадать с дискретной переменной. Размерности переменных, отложенных по осям координат, можно ввести под обозначением оси абсцисс (мин) и слева от обозначений оси ординат (К).

Кривые на рисунке Приложения 5 наглядно показывают, что превышение температуры существенно зависит от режима работы электротехнического устройства.

Зависимости превышения температуры от времени для нагрева при постоянном напряжении для трех вариантов расчета показаны на рис. 1 рабочего документа TU.mcd (Приложение 6). При построении верхней τ_{20t} и нижней τ_{yt} кривых сопротивление обмотки R и

удельный обобщенный коэффициент теплоотдачи k_T принимались постоянными за все время включения. При этом R и k_T для верхней кривой определялись при $\tau=0$, а для нижней — при установившемся превышении температуры τ_y, предварительно рассчитанном на MCAD. Средняя кривая τ_t повторяет нижнюю кривую τ_{Ut}, изображенную на рис. 1 документа TIPU (Приложение 5), т. е. учитывает зависимости R и k_T от температуры.

При R и k_T, не зависящих от t, а значит, и от τ, уравнение (4.1) становится линейным. Его решение при начальном превышении температуры $\tau_0=0$ имеет вид:

$$\tau=\tau_y\cdot(1-e^{-t/T}), \tag{4.6}$$

где установившееся превышение температуры

$$\tau_y=U^2/(R\cdot k_T\cdot S) \tag{4.7}$$

и постоянная времени $T=c\cdot m/(k_T\cdot S)$. Верхняя кривая на рис.1 документа TIPU.mcd (Приложение 5) фактически соответствует (4.6) при неизменных R и k_T, определенных при $\tau=0$; нижняя — при $\tau=\tau_y$.

Сравнение кривых на рис. 1 документа TU показывает, что расчет динамики нагрева, не учитывающий изменение R и k_T во времени, дает заметные погрешности. Однако, принимая во внимание совпадение нижней и средней кривых в установившемся режиме, τ_y можно определить «вручную» методом последовательных приближений. В качестве первого следует взять превышение температуры, допустимое для заданного класса нагревостойкости изоляции провода обмотки, по (4.2) и (4.3) рассчитать R и k_T, а по (4.7) — τ_y. Далее оно уточняется, если первоначально принятое будет отличаться от рассчитанного по (4.7). Ясно, что на MCAD 6.0 Plus расчет как динамики нагрева, так и значения установившегося превышения температуры получается значительно быстрее и точнее.

4.2. Включение и отключение дросселя

В документе DRDCON (Приложение 7) рассматривается включение дросселя в цепь с постоянным напряжением U (рис. 4.1), в документе DROFF (Приложение 8) — его отключение от источника с одновременным замыканием на внешнее сопротивление rext (рис. 4.2, *а* и *б*), а в документе DRLOOP (Приложение 9) рассматривается работа дросселя при синусоидальном изменении во времени потока в его магнитопроводе. В документах DRDCON и DROFF не учитываются гистерезис и вихревые токи (считается, что намагничивание и размагничивание дросселя происходит по основной

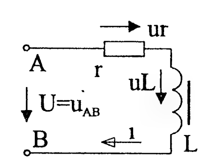




Рис. 4.1. Схема включения

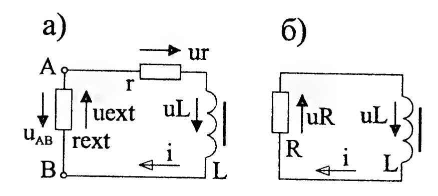


Рис. 4.2. Схема отключения

кривой намагничивания), а в документе DRLOOP — учитываются (считается, что намагничивание и размагничивание дросселя происходит по динамической петле гистерезиса). Во всех трех документах рассматриваются дроссели с замкнутым магнитопроводом, не учитываются потоки рассеяния.

4.2.1. Включение дросселя на постоянное напряжение (см. также рабочий документ DRDCON — Приложение 7)

В документе DRDCON между рядами точек находятся строки рабочего документа, опущенные в Приложении 7. С помощью функции READPRN они извлекают данные по кривой намагничивания стали 10895 и проводят с ними предварительные преобразования, показанные в документе B(H) (Приложение 1), в котором эти строки тоже находятся между рядами точек, но не удалены. Далее в документе DRDCON интерполируется не функция H(B) зависимости напряженности магнитного поля от индукции, как в Приложении 2, а функция i(Ф) зависимости тока от потока, которая позволяет решить с помощью метода Рунге — Кутта исходное дифференциальное уравнение (4).

Опишем процесс включения дросселя, пользуясь полученными в Приложении 7 расчетными данными и графиками (предварительно следует ознакомиться с документом DRDCON).

С момента включения ($t=0$) до момента $t \approx 0{,}05$ с для существенного увеличения потока (рис. 3) достаточно небольшого увеличения тока (примерно до 0,0075 А — см. рис. 5). В этот промежуток времени магнитопровод дросселя работает на почти вертикальном участке кривой намагничивания — при индукциях примерно до 1,2 Тл (см. рис. 9). Этот участок соответствует большим значениям индуктивности L (рис. 7 и 8). В районе верхнего «колена» кривой B(H) и после переваливания через него (последнее наступает по времени примерно при $t=0{,}1$ с; рис. 3 и 4), дальнейшее увеличение потока (рис. 3) и уменьшение индуктивности (рис. 8) почти не происходит.

Сравнение рис. 9 и 3 показывает, что кривая B(t) повторяет кривую Ф(t) в других масштабах по осям ординат, что соответствует выражению (5).

4.2.2. Отключение дросселя (см. также рабочий документ DROFF — Приложение 8)

В рабочем документе DROFF (Приложение 8) показан процесс отключения дросселя от источника напряжения при одновременном замыкании его концов на сопротивление $\text{rext}=10^5$ Ом, которое более чем на два порядка больше активного сопротивления провода обмотки $\text{r}=700$ Ом (см. схемы на рис. 4.2, *а* и *б*). В этом режиме наибольший интерес представляют, пожалуй, кривые изменения во времени напряжения uext на внешнем сопротивлении обмотки rext, напряжения ur на сопротивлении r обмотки провода и напряжения uL на индуктивности L дросселя (рис. 5 и 6). Сплошная кривая на рис. 5 показывает, что при принятых исходных данных напряжение uext на зажимах дросселя при его отключении от источника неизменного во времени напряжения превышает это напряжение более чем на два порядка. Режим, рассчитанный в документе DROFF, фактически моделирует отключение дросселя от источника напряжения путем простого размыкания его цепи. Перенапряжение (превышение напряжения uext над напряжением источника), возникающее при этом, приводит обычно к пробою контактного промежутка и возникновению электрической дуги. Примерное моделирование процессов изменения напряжений в этом случае можно осуществить с помощью документа DROFF, если уменьшить внешнее сопротивление rext.

На рис. 4.3 приведены кривые изменения напряжений при сопротивлениях $\text{rext}=7000$ Ом (*а*) и $\text{rext}=0$ (*б*). Как видим, начальное значение напряжения тем выше, чем больше rext (оно равно произведению тока $\text{i}(\Phi_0)$ в момент отключения источника на это со-

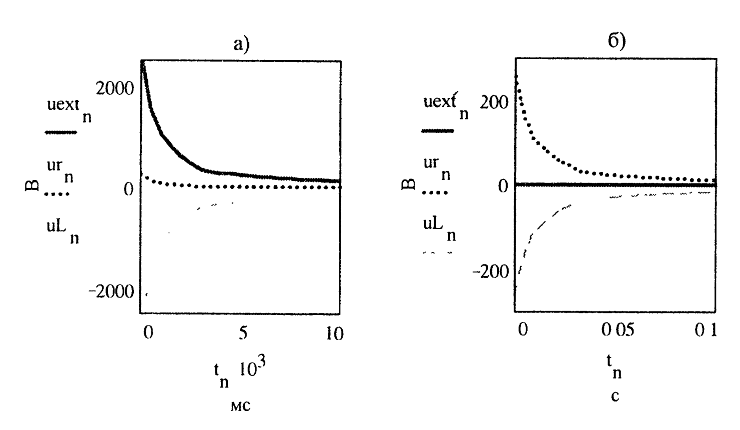


Рис. 4.3. Зависимости от времени напряжений на элементах цепи обмотки дросселя при его отключении от источника с одновременным замыканием концов обмотки на сопротивление $\text{rext}=10\cdot\text{r}$ (*а*) и $\text{rext}=0$ (*б*). Получены с помощью документа DROFF. Остальные параметры — как в Приложении 8

противление), а длительность процесса, наоборот, уменьшается с увеличением rext. Так, на рис. 5 Приложения 8 (при rext = $= 10^5$ Ом) она составляет примерно 1 мс, а на рис. 4.3, *б* (при rext = 0) — около 100 мс. Самый безболезненный способ отключения дросселя — закорачивание его концов при одновременном отключении источника питания (рис. 4.3, *б*). При этом напряжение ur на сопротивлении провода обмотки дросселя гасится напряжением uL на индуктивности обмотки (в любой момент времени они равны по модулю и противоположны по знаку). Значения этих напряжений соизмеримы с напряжением источника питания, т. е. значительно ниже тех, которые имели место на рис. 5 Приложения 8 и рис. 4.3, *а*.

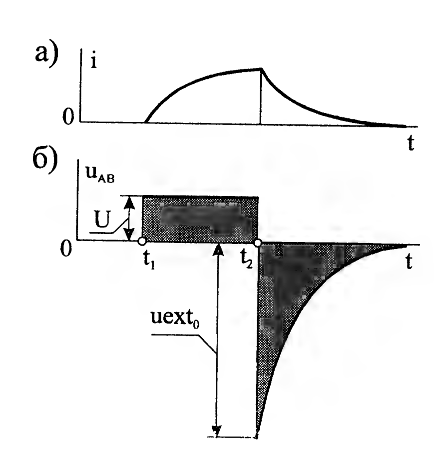


Рис. 4.4. Изменение во времени тока i в обмотке дросселя (*а*) и напряжения U_{AB} на его выводах А и В (*б*) (см. рис. 4.1 и 4.2). В момент t_1 дроссель подключается на внешнее напряжение U (см. рис. 4.1), в момент t_2 — отключается от U с одновременным закорачиванием его концов на сопротивление rext (см. рис. 4.2, *а*)

В заключение на рис. 4.4 показаны кривые изменения тока (*а*) и напряжения U_{AB} (*б*) на выводах АВ (см. рис. 4.1 и 4.2) дросселя при включении его на напряжение U (в момент t_1) и отключении от напряжения в момент t_2 с одновременным замыканием на внешнее сопротивление. Из рис. 4.2, *а* видно, что при отключении направление U_{AB} противоположно направлению uext, поэтому если на рис. 5, Приложения 8 и рис. 4.3, *а* напряжение uext > 0, то на рис. 4.4 оно отложено в области отрицательных значений.

Таким образом, напряжение на концах дросселя в момент его отключения меняет знак. Такой же процесс, осложненный движением якоря, происходит и при отключении от источника питания обмотки электромагнита.

4.2.3. Форма кривой тока при синусоидальном потоке (см. также рабочий документ DRLOOP.mcd — Приложение 9)

Симметричная петля гистерезиса документа H(B)LOOP (см. Приложение 3) в документе DRLOOP перестраивается в петлю гистерезиса дросселя, которая описывается двумя функциями зависимости тока в обмотке от магнитного потока: i_u(ф) при намагничивании и i_d(ф) при размагничивании (см. рис. 2 Приложения 9).

Так как не учитывается активное сопротивление обмотки дросселя, то при косинусоидальном напряжении источника питания магнитный поток в сердечнике дросселя изменяется синусоидально. В документе DRLOOP получена функция $i(\phi,u_E)$, которая позволяет построить кривую изменения тока в обмотке дросселя от времени (см. сплошную линию рис. 3 Приложения 9). Этот рисунок показывает, что кривая тока имеет несинусоидальный характер, а через ноль она проходит позднее, чем кривая напряжения (штрих-пунктирная линия на рис. 3 Приложения 9). Синусоидальная кривая потока там же изображена штриховой линией.

Теория вопроса, исследованного в рабочем документе, подробно изложена на с. 48 — 50 [1], а рис. 2.8, *б* [1] с кривыми изменения во времени потока, напряжения и тока практически совпадает с полученным нами рис. 3 Приложения 9. На последнем сохранены даже типы линий кривых, изображенных на рис. 2.8, *б* [1].

4.3. Динамика процессов в цепях двухобмоточного воздушного трансформатора

Для исследований выбран воздушный трансформатор по трем причинам. Во-первых, для оценки правильности нашего решения системы из двух обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с помощью MCAD. Это возможно потому, что такая система, описывающая динамику работы двухобмоточного воздушного трансформатора, решается аналитически [9]. Таким образом, аналитическое решение этого идеализированного трансформатора взято как критерий правильности расчетов в системе MCAD. Аналогичное сравнение результатов расчета в системе MCAD и аналитического расчета для одного обыкновенного линейного дифференциального уравнения нами тоже были сделаны (например, для режима включения и отключения цепи с постоянной индуктивностью и активным сопротивлением), дали идеальное совпадение, но ввиду их простоты здесь не приводятся.

Вторая причина — исследование такого трансформатора дает ответ на вопрос о влиянии вихревых токов в магнитопроводе электромагнита (а также в его короткозамкнутой обмотке, витке, гильзе — при наличии таковых) на динамику включения и отключения, так как вихревые токи в магнитопроводе возникают по той же причине, что и токи во вторичной обмотке трансформатора (по закону электромагнитной индукции).

Наконец, третья причина — показать, что при наличии у исследователя компьютера с системой MCAD версии не ниже 6.0 Plus профессиональной редакции даже при возможности аналитического решения дифференциальных уравнений переходного процесса

следует предпочесть их численное решение на MCAD, так как оно получается значительно быстрее, проще, позволяет мгновенно строить наглядные графики любых рассчитанных величин, а точность результата практически такая же, как при аналитическом решении.

4.3.1. Включение (см. также рабочий документ VTSON.mcd — Приложение 10)

Схемы включения исследуемого трансформатора показаны на рис. 4.5, *а* и *б*. На рис. 4.5, *а* направление токов в обмотках — согласное. На схеме это условно показано так: токи i1 первичной и i2 вторичной обмоток входят в обмотки со стороны точки. Такое условное обозначение применяется для того, чтобы не рисовать направление навивки витков трансформатора относительно токов. При таком изображении напряжения, обусловленные потоками взаимной индукции, в уравнения второго закона Кирхгофа для электрических цепей обеих обмоток подставляются с плюсом (см. +M·di2/dt в строке (11) и +M·di1/dt в строке (12) Приложения 10).

Кривые изменения токов в обмотках трансформатора для исходных данных [9] при коэффициенте связи обмоток k=0,632 и при их согласном направлении показаны на рис. 1 Приложения 10. Эти кривые полностью идентичны построенным на рис. V.2 [9], что подтверждает правильность наших расчетов. Обратим внимание также на то, что предварительно принятое условно-положительное направление тока во вторичной цепи соответствует отрицательным значениям тока i2 на всем протяжении переходного процесса.

На рис. 4.6 показаны кривые, полученные нами для схемы рис. 4.5, *б*, в которой принято встречное направление токов в обмотках трансформатора (при этом в правой части уравнений (11) и

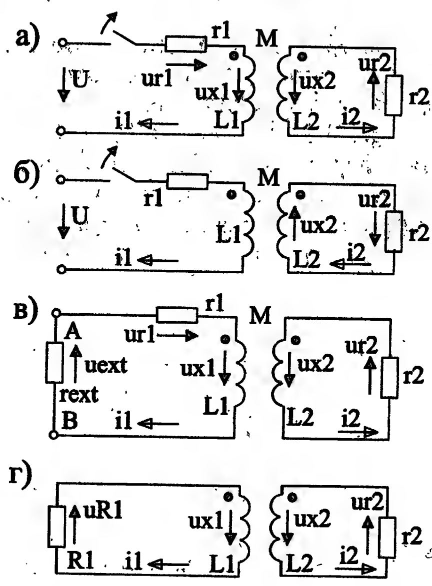


Рис. 4.5. Схемы включения первичной цепи двухобмоточного воздушного трансформатора на напряжение U при согласном (*а*) и встречном (*б*) направлении токов, а также схемы отключения первичной обмотки от источника с одновременным замыканием на rext при согласном направлении токов (*в* и *г*)

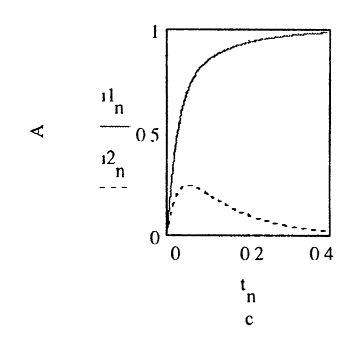


Рис. 4.6. Зависимость токов в обмотках воздушного трансформатора от времени при их встречном направлении и коэффициенте связи k=0,632. В момент t=0 первичная обмотка подключается к постоянному напряжению. Параметры — как в Приложении 10

(12) Приложения 10 перед последними слагаемыми необходимо поставить минус вместо плюса). Обратим внимание на то, что при таком варианте предварительно выбранных условно-положительных направлений токов и напряжений точечная кривая тока i2 на рис. 4.6 располагается выше оси абсцисс. Сравнение рис. 1 Приложения 10, взятого в совокупности с условно-положительными направлениями токов и напряжений на рис. 4.5, *а*, с рис. 4.6, взятым в совокупности с условно-положительными направлениями токов и напряжений на рис. 4.5, *б*, говорит о том, что представление процесса с помощью каждой из этих пар равноправно и приводит к одному и тому же результату: в действительности вторичная обмотка воздушного трансформатора при включении создает магнитный поток, направленный встречно потоку, создаваемому первичной.

Рис. 1 Приложения 10 и рис. 4.6 показывают, что при подключении первичной обмотки к постоянному напряжению ток в ней монотонно возрастает до своего установившегося значения, а во вторичной — сначала возрастает до некоторого максимума, а затем монотонно падает до нуля. Время возрастания тока вторичной обмотки сильно зависит от коэффициента связи обмоток k=

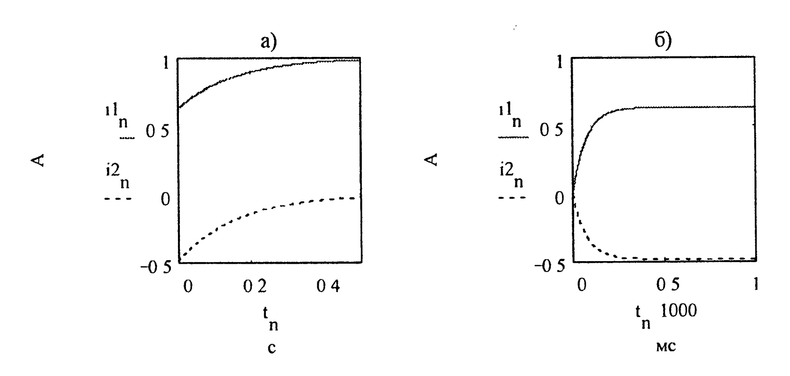


Рис. 4.7. Зависимости токов в обмотках воздушного трансформатора от времени при их согласном направлении и коэффициенте связи k=0,999. Первичная обмотка в момент t=0 включается на постоянное напряжение. Остальные параметры — как в Приложении 10

$= M/(L1 \cdot L2)^{1/2}$, где M — взаимоиндуктивность, а L1 и L2 — собственные индуктивности обмоток. На рис. 1 Приложения 10 (при k = 0,632) оно составляет примерно 0,04 с = 40 мс, а на рис. 4.7 при коэффициенте связи, близком к единице (k = 0,999),— всего 0,3 мс. Напротив, при коэффициенте связи, близком к нулю (k = 0,0001), ток во вторичной обмотке остается практически равным нулю на протяжении всего переходного процесса, а в первичной обмотке он возрастает, как при включении цепи с постоянной индуктивностью L1 и активным сопротивлением r1 на напряжение U, т. е. с постоянной времени $\tau_1 = L1/r1 = 0{,}058$ Гн/1 Ом $\approx 0{,}06$ с (см. рис. 4.8).

На рис. 4.9 показан процесс включения первичной обмотки воздушного трансформатора на синусоидально изменяющееся напряжение с начальной фазой $\pi/8$. Из рисунка видно, что токи в первичной и вторичной обмотках примерно через четыре периода устанавливаются и в любой момент времени они имеют разные

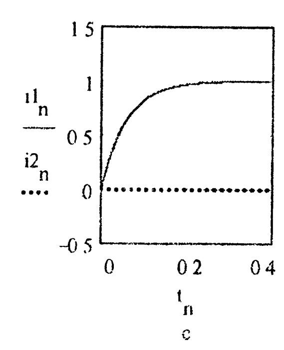


Рис. 4.8. Зависимости токов в обмотках воздушного трансформатора от времени при их согласном направлении и коэффициенте связи k = 0,0001. Первичная обмотка в момент t = 0 включается на постоянное напряжение. Остальные параметры — как в Приложении 10

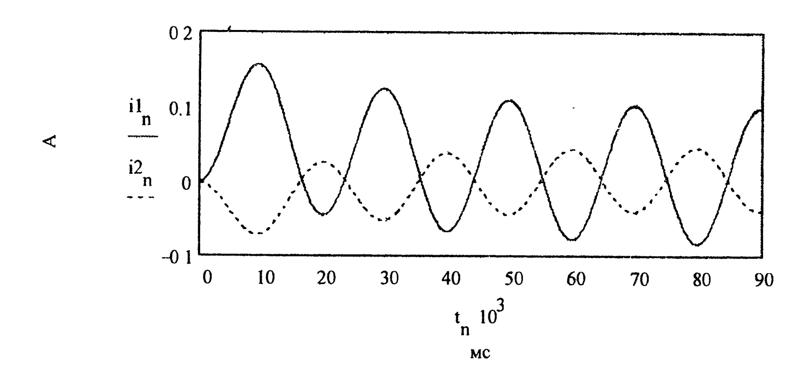


Рис. 4.9. Зависимости токов в обмотках воздушного трансформатора от времени при их согласном направлении и коэффициенте связи k = 0,632. Первичная обмотка в момент t = 0 включается на синусоидально изменяющееся напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi/8)$ при U = 1 В и $\omega = 314$ c^{-1}. Остальные параметры — как в Приложении 10

знаки (при предварительно выбранных согласных направлениях токов — по рис. 4.5, *а*). Кривые рис. 4.9 получаются с помощью документа VTSON, в котором вместо U:=1 в исходные данные подставляются строки: U_m:=1; ω:=314; U:=$U_m \cdot \sin(\omega \cdot t+\pi/8)$.

4.3.2. Отключение (см. также рабочий документ VTSOFF — Приложение 11)

Схемы отключения первичной обмотки воздушного трансформатора от источника с одновременным закорачиванием ее на внешнее активное сопротивление rext показаны на рис. 4.5, *в* и *г* с согласным направлением токов в обмотках. Сам процесс рассмотрен в рабочем документе VTSOFF (Приложение 11), в котором принято достаточно большое для параметров исследуемого трансформатора сопротивление rext=200 Ом (примерно в 200 раз больше активного сопротивления провода первичной обмотки r1=0,99821 Ом). Коэффициент связи k=0,632. Рис. 1 и 2 Приложения 11 показывают, что ток в первичной обмотке практически мгновенно (примерно за 0,5 — 1 мс на рис. 2) падает до нуля, а во вторичной обмотке за это время возрастает до некоторого максимального значения, а затем медленно с постоянной времени τ_2, которая определяется индуктивностью L2=0,1 Гн и активным сопротивлением r2=1 Ом цепи вторичной обмотки, уменьшается до нуля (τ_2=L2/r2=0,1 Гн/1 Ом=0,1 с; см. рис. 1).

Рис. 3 Приложения 11 показывает, что в начальный момент процесс отключения сопровождается возникновением напряжения uext на концах первичной обмотки порядка 200 В, что в 200 раз превосходит напряжение отключаемого источника питания U=1 В. Рис. 3, 5, 6 и 7 показывают, что напряжения, превосходящие на 1 — 2 порядка напряжение U отключаемого источника, быстро уменьшаются (примерно за 0,5 — 1 мс), однако переходный процесс изменения тока во вторичной обмотке продолжается, как уже было сказано, значительно дольше (до 0,4 с по рис. 1). Так же долго продолжается и переходный процесс изменения напряжений на элементах вторичной цепи (рис. 8).

На рис. 4.10 изображен переходный процесс отключения первичной обмотки рассмотренного трансформатора с одновременным ее закорачиванием (rext=0). Сравнение рис. 4.10, *а* с рис. 1 и 2 Приложения 11 показывает, что при закорачивании первичной обмотки в момент ее отключения от источника переходные процессы в первичной цепи трансформатора проходят гораздо медленнее, чем в случае соединения ее концов с большим внешним сопротивлением. Сравнение рис. 4.10, *б* с рис. 3 Приложения 11 подтверждает этот вывод, а также показывает, что отключение с закорачиванием на сопротивление rext=0 — самый безопасный способ обесточивания трансформатора.

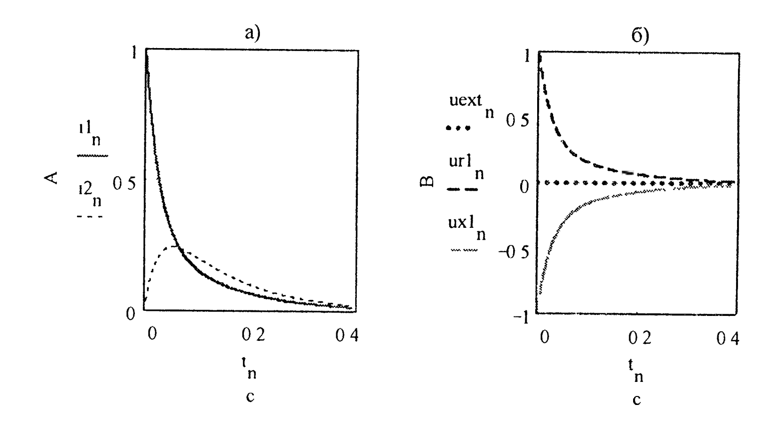


Рис. 4.10. Кривые изменения во времени токов в обмотках (*а*) и напряжений на элементах цепи первичной обмотки (*б*) трансформатора при ее отключении от источника с одновременным закорачиванием концов (rext = 0). Коэффициент связи k = 0,632. Остальные параметры — как в Приложении 11

На рис. 4.11 изображен переходный процесс в том же трансформаторе, что в Приложении 11 (при rext = 200 Ом), но при коэффициенте связи обмоток, близком к нулю (в Приложении 11 k = 0,632). Из этого рисунка видно, что отключение такого трансформатора происходит аналогично отключению постоянной индуктивности: ток во вторичной обмотке не возникает (i2 = 0 на рис. 4.11, *а*), а в первичной уменьшается по экспоненте с постоянной времени $\tau_1 = L1/(rext + r1) = 0{,}058$ Гн/(200 + 1) Ом ≈ 0,3 мс. Процесс на рис. 4.11 очень похож на описанное в документе DROFF (см. рис. 4 — 6 Приложения 8) отключение дросселя при rext = 10^5 Ом. Для дросселей с rext = 7000 Ом и rext = 0 оно показано также на рис. 4.3.

Принципиальное отличие отключения обмотки дросселя от отключения первичной обмотки воздушного трансформатора с коэффициентом связи, близком к нулю, состоит в том, что индуктивность обмотки дросселя изменяется при отключении в широких пределах (см. рис. 7 Приложения 8), тогда как индуктивность первичной обмотки воздушного трансформатора от времени не зависит. Поэтому ток в первичной обмотке трансформатора с коэффициентом связи k ≈ 0 уменьшается по экспоненте (сплошная кривая на рис. 4.11, *а*), а кривую уменьшения тока в обмотке дросселя (рис. 4 Приложения 8) экспонентой назвать нельзя.

Процесс отключения воздушного трансформатора при коэффициенте связи обмоток, близком к единице, показан на рис. 4.12 при rext = 200 Ом и 4.13 при rext = 2 Ом. В течение очень короткого промежутка времени (0,04 мс при rext = 200 Ом на рис. 4.12, *б* и 1 мс при rext = 2 Ом на рис. 4.13, *б*) ток в первичной

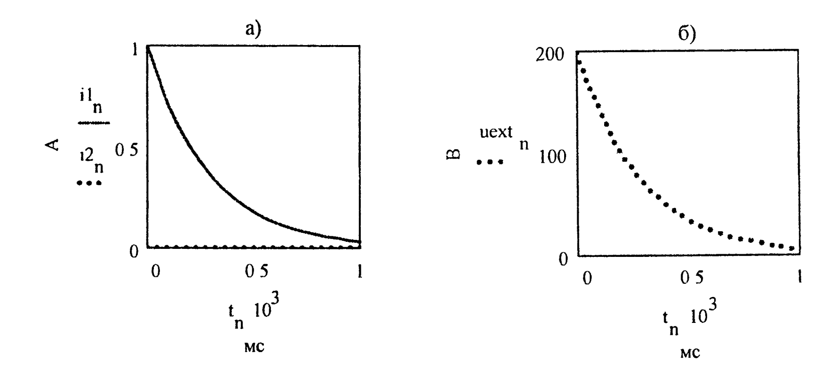


Рис. 4.11. Кривые изменения во времени: токов в обмотках (*а*) и напряжения на внешнем активном сопротивлении rext = 200 Ом цепи первичной обмотки (*б*) воздушного трансформатора при ее отключении от источника с одновременным закорачиванием на rext. Коэффициент связи k = 0,0001. Остальные параметры — как в Приложении 11

обмотке уменьшается до нуля при rext = 200 Ом и почти до нуля при rext = 2 Ом, а во вторичной — увеличивается до некоторого значения. Далее ток во вторичной обмотке с постоянной времени τ_2 = L2/r2 = 0,1 Гн/1 Ом = 0,1 с падает за 0,4 с практически до нуля (причем этот процесс мало зависит от rext — см. рис. 4.12, *а* и 4.13, *а*). В момент отключения источника напряжение на rext оказывается равным rext · i1(0) (200 В при rext = 200 Ом), но за очень короткое время (<0,4 мкс при rext = 200 Ом — см. рис. 4.12, *в*) падает до нуля.

Если сравнить скорости уменьшения тока в первичной обмотке воздушного трансформатора при одинаковых значениях внешнего сопротивления rext, на которое она замыкается в момент ее отключения от источника, но при разных значениях коэффициента связи (см. рис. 1 и 2 Приложения 11 при k = 0,632; рис. 4.11, *а* при k ≈ 0 и рис. 4.12, *а* при k ≈ 1), то можно сделать вывод о том, что увеличение коэффициента связи приводит к ускорению падения тока i1 на начальных этапах всего процесса. Следствием этого изменения первичного тока является быстрое уменьшение напряжения uext на сопротивлении rext. Так, при коэффициенте связи k ≈ 1 это напряжение уменьшается до нуля за время, меньшее 0,2 мкс (рис. 4.12, *в*); при k = 0,632 — за время порядка 0,5 мс (рис. 3 Приложения 11), а при k ≈ 0 — за 1 мс (рис. 4.11, *б*).

В заключение обсудим кривые изменения потокосцеплений исследуемого трансформатора. Рис. 10 Приложения 11 показывает, что при отключении его первичной обмотки с одновременным замыканием на сопротивление в любой момент времени суммарное

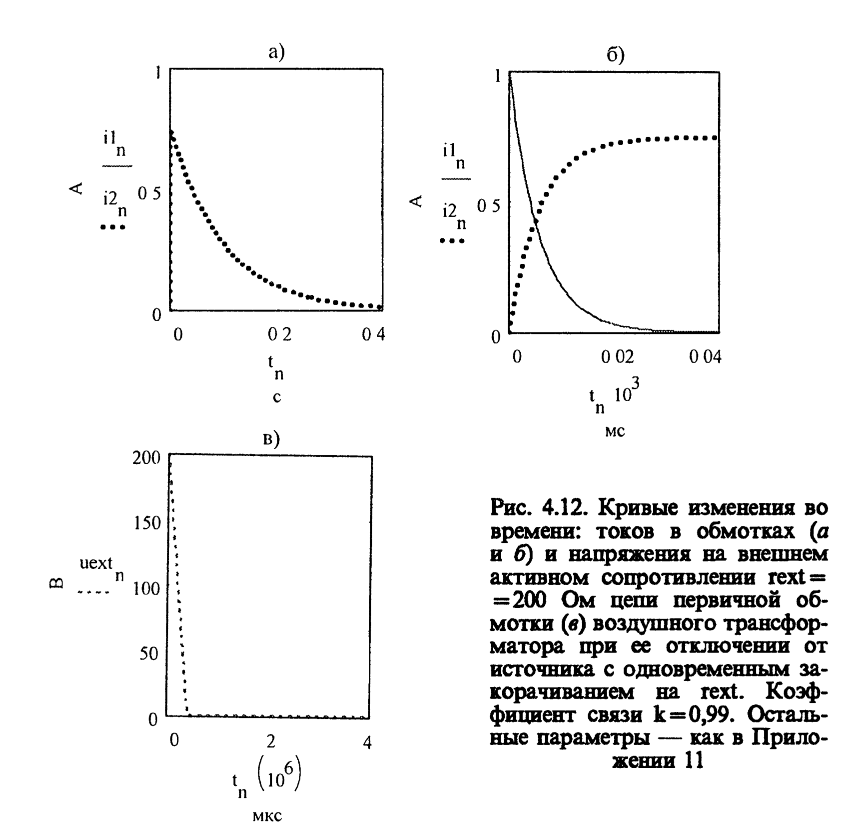


Рис. 4.12. Кривые изменения во времени: токов в обмотках (*а* и *б*) и напряжения на внешнем активном сопротивлении rext = =200 Ом цепи первичной обмотки (*в*) воздушного трансформатора при ее отключении от источника с одновременным закорачиванием на rext. Коэффициент связи k=0,99. Остальные параметры — как в Приложении 11

потокосцепление ψ1 первичной обмотки (тонкая сплошная линия) больше, чем собственное ψL1 (жирная штриховая), за счет потокосцепления ψM1 взаимной индукции, обусловленного наличием вторичной обмотки (кривая из жирных точек). При отключении это потокосцепление (ψM1) имеет то же направление, что и собственное, создаваемое током i1 первичной обмотки. Напомним, что при включении поток взаимной индукции имеет противоположное направление и ослабляет поток, создаваемый первичной обмоткой (см. рис. 7 Приложения 10; на нем кривая потокосцепления ψM1, созданного током вторичной обмотки, находится ниже оси абсцисс). Такое изменение знака потока взаимной индукции вполне соответствует закону Ленца, по которому ток, индуцированный во вторичной обмотке, должен создавать поток, противодействующий изменению потока, созданного током первичной обмотки, т. е. при увеличении первичного потока вторичный должен быть направлен согласно с первичным.

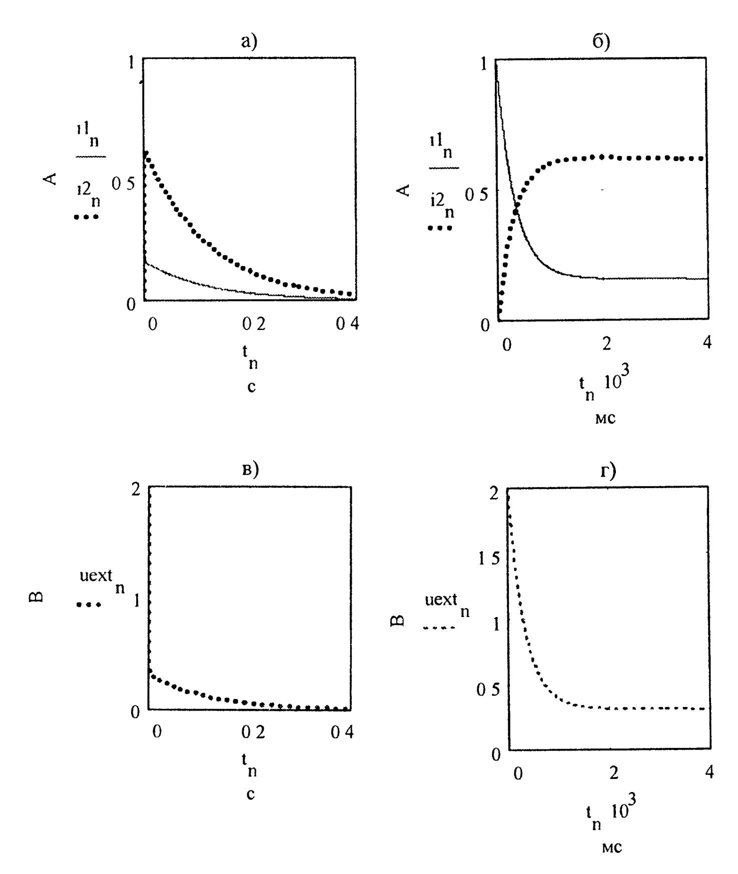


Рис. 4.13. То же, что на рис. 4.12, но при rext=2 Ом

Вихревые токи, возникающие в магнитопроводе электромагнита при включении и отключении, оказывают на режим работы его магнитной системы влияние, аналогичное рассмотренному влиянию вторичной обмотки трансформатора.

Глава 5

ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В учебной литературе по электроаппаратостроению расчет динамики включения электромагнита постоянного тока базируется обычно на графоаналитическом методе последовательных приближений

Н. Е. Лысова [6, 7]. В [8] проанализированы многие известные в то время методы расчета динамики таких электромагнитов, но современный подход к этому вопросу с использованием ЭВМ для численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих этот процесс, дан, насколько нам известно, только в [5]. Однако в [5] задачи расчета решаются на версии алгоритмического языка Фортран, приспособленной к стационарным ЭВМ типа ЕС и СМ. ЭВМ этого типа на настоящий момент устарели. На современных версиях известных алгоритмических языков, приспособленных для работы на персональных компьютерах и имеющих математические библиотеки, в том числе и на Фортране, эта задача тоже может быть решена. В главе 5 книги дана попытка изложить вопросы расчета динамики включения электромагнита с использованием системы MCAD [3, 4], которая обладает рядом преимуществ перед алгоритмическими языками программирования, в том числе их современными версиями. В частности, она не требует такого сложного программирования и делает расчеты очень наглядными благодаря простоте построения графиков.

Расчет статических характеристик электромагнита постоянного тока, необходимых для расчета его динамики, осуществляется по оверлейной QB-программе DU, близкой к программе DC, описанной в [2]. Фрагменты листинга модуля DU2 этой программы, отличающиеся от соответствующих частей DC2, приведены в Приложении 12. Программа DU выводит в файлы iddu.dat, xPsiu.dat, iu.dat, Flwu.dat, Pemxu.dat и Pu.dat (см. Приложение 13) данные, необходимые для расчета динамики включения электромагнита, который обеспечивает рабочий документ DUON.mcd (Приложение 14).

На рис. 5.1 приведены кинематические схемы электромагнитов, динамику включения которых можно рассчитать с помощью рабочего документа DUON.mcd. Последний позволяет этот расчет сделать и для прямоходовых электромагнитов, но, к сожалению, программа DU для этого пока не приспособлена.

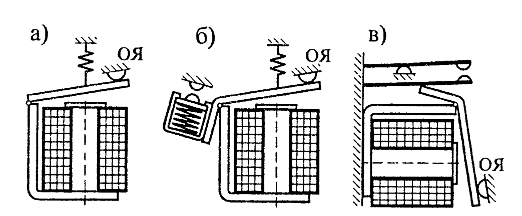


Рис. 5.1. Кинематические схемы электромагнитов: *а*) с одной возвратной пружиной растяжения; *б*) с возвратной пружиной растяжения и контактной пружиной сжатия; *в*) с прямыми плоскими пружинами, консольно закрепленными на корпусе

Как программа DU, так и рабочий документ DUON.mcd подробно комментированы и читаются без дополнительных пояснений. Остановимся здесь лишь на их некоторых особенностях.

5.1. Особенности ввода данных

Фрагмент листинга модуля DU2 (Приложение 12) заменяет часть листинга модуля DC2, начиная с п. 2.6 [2, с. 443] и кончая обращением к процедуре Menu2ov на с. 444 [2]. Подпрограммы Fu и Fl.F этого Приложения заменяют подпрограммы DC2 с теми же именами. Наконец, в DU2 вводится вспомогательная подпрограмма ifelse (см. в конце Приложения 12), которой нет в DC.

Рассмотрим эти отличия подробнее.

Модуль DU2 строит кривые намагничивания не в виде зависимости рабочего потока F1 от МДС обмотки UmmL, как это делает программа DC (см. рис. 6 на с. 463 [2]), а в виде зависимостей потокосцепления Flw от тока обмотки Iob (рис. 5.2). Параллельно с этим построением или независимо от него пользователь может координаты точек кривых зависимости потокосцепления от тока вывести в файлы данных для тока (iu.dat Приложения 13), для потокосцепления (Flwu.dat там же) и для электромагнитной силы (Pemxu.dat там же), причем в два последних файла данные выводятся для каждого рассчитываемого положения якоря. Кривые на рис. 5.2 строятся тоже для каждого рабочего зазора электромагнита в отличие от кривых намагничивания на рис. 6 с. 463 [2]. Число положений якоря задается пользователем в программе DU через список исходных данных при запуске на исполнение модуля DU0, т. е. в самом начале работы с программой, и в MCAD-документе его изменить нельзя.

Для удовлетворительного расчета процесса включения в DUON.mcd этих положений должно быть не менее пяти, иначе будут сказываться неточности нескольких последовательных интерполяций, которые осуществляются в DUON.mcd. Оптимальным можно считать 8 — 9 положений. В примере расчета, приведенном в документе DUON.mcd, пять положений выбраны для экономии места, а также для того, чтобы не усложнять восприятие материала нагромождением больших массивов данных.

Кроме числа положений якоря, на точность дальнейших расчетов влияют также и другие параметры, которые пользователь должен вводить по запросу с экрана перед построением кривых и выводом в файлы расчетных данных. Прежде всего — это число точек, по которым строится каждая кривая на рис. 5.2 (см. строки от (1) до (2) Приложения 12). Координаты этих же точек выводятся и в файлы. С экрана предлагается ввести 52, 26, 13 и 7. В Приложении 14 в качестве примера, опять-таки для экономии места, принято 13, но оптимальным можно считать 26. Следует учесть при выборе количества точек, что при росте их числа увеличивается не только точность интерполяций, но и время построения кривых и вывода данных в файлы, которое составляет значительную часть всего времени работы программы DU.

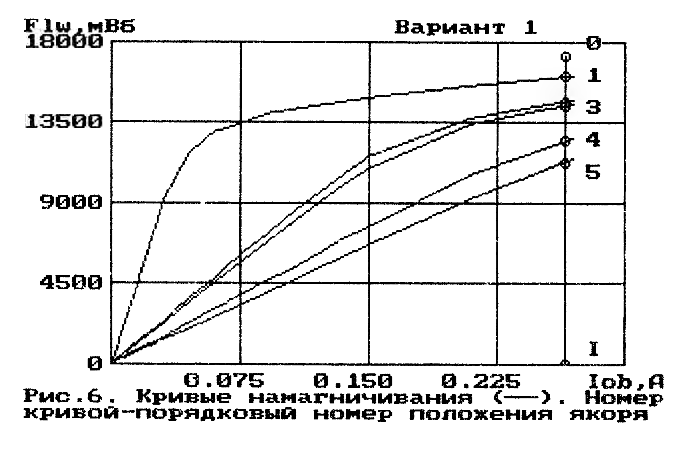


Рис. 5.2. Зависимости потокосцепления от тока, построенные QB-программой DU при 5 положениях якоря, 13 точках для каждой кривой и при max.I=0,3 А

Следующий параметр, который пользователь вводит по сообщению с экрана, обеспечиваемому строками (3) — (4) Приложения 12,— это максимальное потокосцепление max.Flw, которое будет отложено по оси ординат при построении кривых зависимости потокосцепления от тока (рис. 5.2). На точность интерполяций при получении функций i(x,ψ) и P(x,ψ) в документе DUON.mcd оно не влияет, так как выводимые в файл Flwu.dat значения потокосцеплений определяются не max.Flw, а максимальным значением тока max.I, которое вводится по запросу с экрана, обеспечиваемому строками (5) — (6) Приложения 12. Если выбрано 13 точек для каждой кривой, то не следует max.I брать существенно большим тока обмотки F/w. Однако при этом интерполяция кривых по данным файлов, особенно при больших значениях потокосцеплений, будет среднего качества (подробнее см. ниже, а также в документе DUON при описании рис. 2 и 3).

Если быстродействие компьютера позволяет кривые рис. 5.2 строить для 26 точек или даже для 52, то max.I можно взять в 1,5 — 2,5 раза большим, чем F/w, например, 0,7 А для нашего случая, как в варианте 2, для которого построенные QB-программой DU кривые изменения потокосцеплений от тока изображены на рис. 5.3. В этом варианте остальные исходные данные — такие же, как в варианте 1 (кроме max.I и числа точек для построения кривых, которое в варианте 2 взято равным 26).

На рис. 5.4 для варианта 2 исходных данных в виде таблицы приведена нижняя часть (для экономии места) матрицы потокосцеплений $mFlw^T$ (всего в таблице должно быть 26 строк с номером 0 самой верхней и 25 самой нижней). Рис. 5.4 показывает, что при

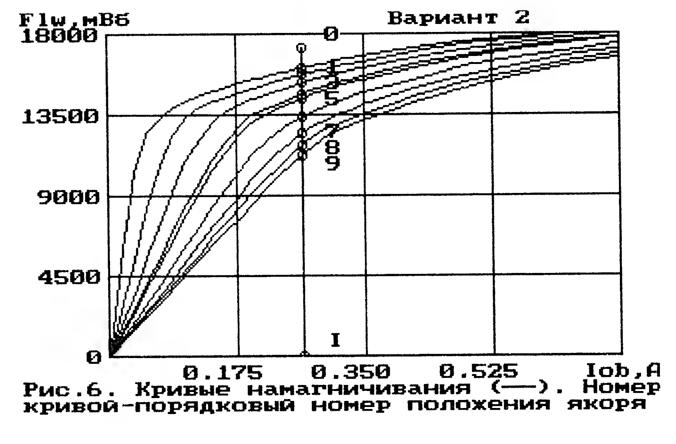


Рис. 5.3. Зависимости потокосцепления от тока, построенные QB-программой DU при 9 положениях якоря, 26 точках для каждой кривой и при max.I = 0,7 A

токах, близких к 0,7 А (они соответствуют последним строкам матрицы рис. 5.4), значения потокосцеплений превосходят максимальное потокосцепление Psimax = 16,081 Вб, задаваемое в строке (11) программы DU. Это обстоятельство позволяет получить интерполяцию более высокого качества, чем проведенную в Приложении 14 для варианта 1 исходных данных. В варианте 2 построенные документом DUON.mcd интерполяционные кривые зависимости тока от потокосцепления приведены на рис. 5.5, тока от перемещения — на рис. 5.6.

Сравнение рис. 5.5 с рис. 2 Приложения 14 показывает, что при max.I = 0,7 А, 9 положениях якоря и 26 точках, параметры которых выводятся в файлы iu.dat и Flwu.dat, интерполяционные кривые $i(x,\psi)$ при больших немагнитных зазорах (три самых

$mFlw^T =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
18	16.512	16.145	15.796	15.289	15.125	14.207	13.473	12.99	12.582
19	16.628	16.288	15.954	15.459	15.294	14.485	13.764	13.283	12.882
20	16 791	16.432	16.099	15 602	15.466	14.713	14.035	13.556	13.19
21	17.214	16.969	16.635	16.261	16.109	15.456	14.945	14.533	14.214
22	17.533	17.394	17.124	16.807	16.697	16.159	15.651	15.275	14.976
23	17 797	17.682	17.467	17.198	17.099	16.626	16.248	15.916	15.621
24	18.066	17.944	17.788	17.525	17.435	17.027	16.706	16.429	16.182
25	18.293	18.175	18.038	17.81	17.741	17.397	17.097	16.842	16.645

Рис. 5.4. Таблица значений потокосцеплений, выведенных в файл Flwu.dat QB-программой DU при 9 положениях якоря, 26 точках для каждой кривой и при max.I = 0,7 А. Соответствует кривым рис. 5.3

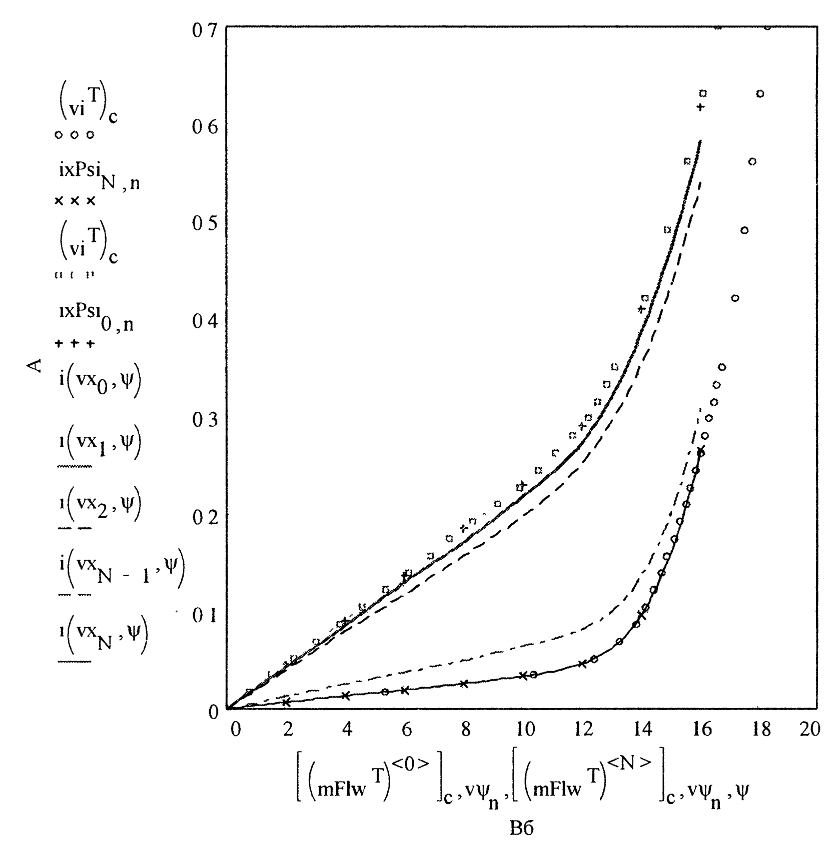


Рис. 5.5. Зависимости тока от потокосцепления, построенные рабочим документом DUON.mcd при 9 положениях якоря, по координатам 26 точек исходных данных, при max.I = 0,7 А. Перемещения в мм: $vx_0 = 0$; $vx_1 = 2{,}64$; $vx_2 = 5{,}03$; $vx_{N-1} = vx_7 = 13{,}1$; $vx_N = vx_8 = 13{,}9$

левых верхних кривых при vx_0, vx_1 и vx_2 на рис. 5.5) не пересекаются, тогда как при max.I = 0,3 А, 5 положениях якоря и 13 точках интерполяционные кривые при этих зазорах (при vx_0 и vx_1 на рис. 2 Приложения 14) пересекаются, что свидетельствует о недостаточно высоком качестве интерполяции в примере Приложения 14. При притянутом якоре интерполяционная кривая на рис. 5.5 (самая нижняя правая) хорошо совмещается с исходными узловыми точками-кружками (их 26 на этом рисунке), а также с 9 крестиками, образованными двумя отрезками, расположенными под углом 45° к горизонтам (эти крестики — узловые точки квадратной матрицы токов ixPsi). Тогда как аналогичная интерполяционная кривая на рис. 2 рабочего документа DUON.mcd проходит мимо большей

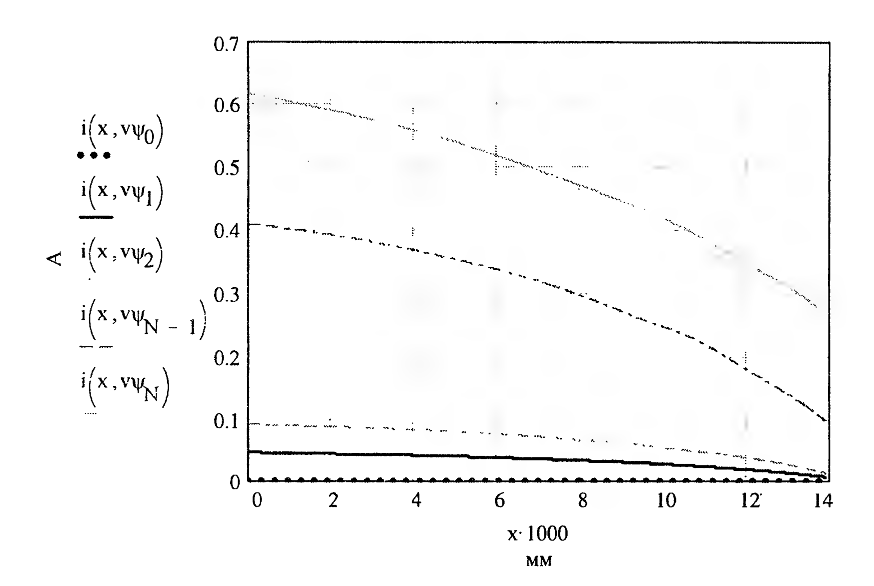


Рис. 5.6. Зависимости тока от перемещения, построенные рабочим документом DUON.mcd при 9 положениях якоря, по координатам 26 точек исходных данных, при max.I=0,7 А. Потокосцепления в Вб: $v\psi_0=0$; $v\psi_1=2{,}01$; $v\psi_2=4{,}02$; $v\psi_{N-1}=v\psi_7=14{,}071$; $v\psi_N=v\psi_8=16{,}081$

части из 13 узловых точек-кружков, что опять-таки подтверждает плохое качество интерполяции в Приложении 14.

Наконец, сравнение плавной верхней кривой на рис. 5.6 (при максимальном фиксированном потокосцеплении $v\psi_N=16{,}081$ Вб) с аналогичной кривой на рис. 3 Приложения 14, имеющей подозрительно вычурный характер, подтверждает желательность увеличения как числа точек, координаты которых выводятся в файлы данных (для кривых на рис. 5.6 их 26, а для кривых на рис. 3 Приложения 14 — их 13), так и значения max.I, определяющего максимальное значение МДС, для которого значения потокосцеплений выводятся в файл Flwu.dat (для кривых рис. 5.6 max.I=0,7 А, а для рис. 3 Приложения 14 max.I=0,3 А).

5.2. Расчет потокосцеплений и электромагнитных сил по QB-программе DU
(см. также Приложение 12)

Расчет потокосцеплений и электромагнитных сил в программе DU обеспечивает подпрограмма Fl.F, к которой расчет переходит в строках (7) — (8) Приложения 12. Эта подпрограмма для значений МДС F, задаваемых ее циклом FOR...NEXT, методом участков

(с использованием подпрограммы Fu) рассчитывает потоки рабочего зазора, потокосцепления и силы, соответствующие этим МДС. Переменные F0, n, nF, которые вводятся перед строками (7) — (8), а также переменная np, которая вводится в (2), задают для исходных МДС разный шаг: в первой половине диапазона изменений МДС, при которых потокосцепление возрастает быстро, особенно при притянутом якоре (см. кривые на рис. 5.2 и 5.3), шаг в 4 раза короче, чем во второй половине. Переменная np задает число МДС, для которых подпрограмма Fl.F определяет потокосцепления и силы, т. е. число точек, по которым строятся кривые и координаты которых выводятся в файлы данных: силы — в строке (19), токи — в строке (17), потокосцепления — в строке (18).

Суммарное потокосцепление определяется оператором (15) по значению потокосцепления рабочего зазора Fl·w и суммарного потокосцепления рассеяния Fldw. Последнее находится в строке (13) подпрограммы Fu, к которой предварительно подпрограмма Fl.F отсылает нас в строке (14).

Электромагнитные силы определяются в строке (16) подпрограммы Fl.F.

Расчет суммарного потокосцепления рассеяния с помощью строки (13) подпрограммы Fu поясняет рис. 5.7, на котором рассматриваемая магнитная система условно показана без обмотки и якоря (для упрощения чертежа). Считаем, что высота обмотки равна длине сердечника lm2 (правой вертикальной части магнитопровода). Принимаем направление тока в сечении обмотки, расположенном в окне магнитопровода, от нас за плоскость рисунка (крестик в кружке на рис. 5.7, *а*). Тогда условно-положительным направлением рабочего потока Φ_δ и всех контуров потоков рассеяния Φ_{dn} можно считать направление вращения часовой стрелки. При этом все потоки рассеяния замыкаются в окне магнитопровода слева направо (рис. 5.7, *а*). Суммарное потокосцепление рассеяния

$$\psi_{dn} = \sum_{n=1}^{m} \Phi_{dn} \cdot w_{dn}, \qquad (5.1)$$

где Φ_{dn} — поток рассеяния n-го участка; w_{dn} — число витков обмотки, охваченное этим потоком; m — число участков.

На рис. 5.7, *а* справа от магнитной системы изображена эпюра изменения числа витков обмотки, которая для каждого из потоков рассеяния позволяет определить, с каким числом витков обмотки он сцеплен. Для примера показано число витков w_{d3}, с которым сцеплен поток рассеяния Φ_{d3}. Расчет по (5.1) как раз и обеспечивает строка (13) подпрограммы Fu Приложения 12. На рис. 5.7, *а* показано текущее значение x, которое используется в строке (13) Прило-

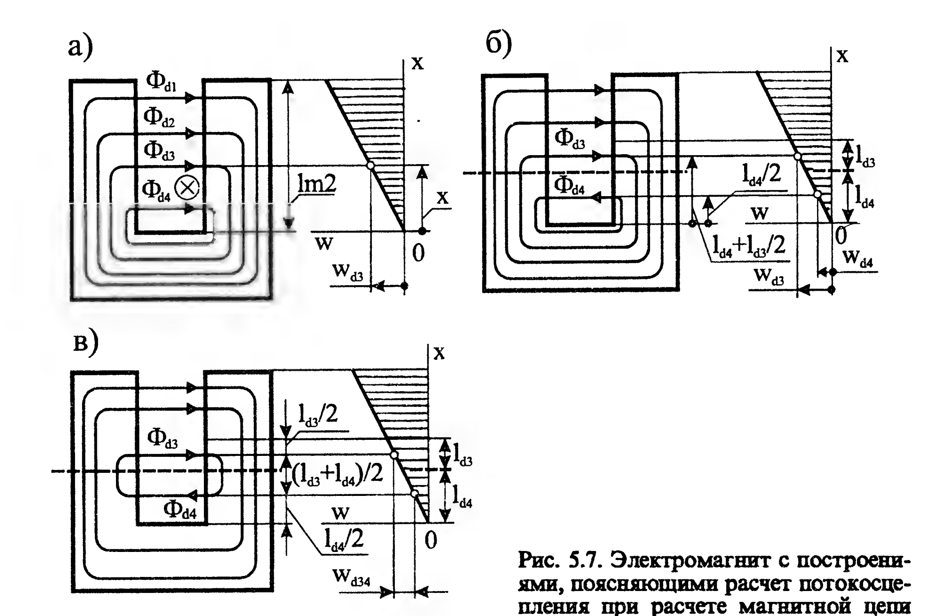


Рис. 5.7. Электромагнит с построениями, поясняющими расчет потокосцепления при расчете магнитной цепи методом участков. Принято m = 4

жения 12 при расчете потокосцепления рассеяния третьего участка по формуле $\Psi_{d3} = \Phi_{d3} \cdot w_{d3}$, где $w_{d3} = x \cdot w_0$; w — полное число витков обмотки; $w_0 = w/lm2$ — число витков на единицу длины обмотки.

Сопротивление нижней части магнитопровода приводит к тому, что магнитное напряжение между его вертикальными частями ниже некоторой штриховой горизонтальной линии меняет свое направление на противоположное, что приводит к изменению направления потоков рассеяния ниже этой штриховой линии (см. контур потока Φ_{d4} на рис. 5.7, *б*).

Программа учитывает знак потока рассеяния автоматически с помощью оператора (12) подпрограммы Fu, определяющего магнитное напряжение Ummd, приложенное к проводимостям рассеяния.

Будем полагать, что поток рассеяния Φ_{d4} — это поток плоскопараллельного поля рассеяния ниже штриховой линии. Выше штриховой линии выделим такую толщину плоскопараллельного поля рассеяния l_{d3}, поток которой Φ_{d3} был бы равен Φ_{d4}. Тогда суммарное потокосцепление рассеяния по (13) для действительных направлений потоков окажется равным

$$\psi_{d\Sigma} = \sum_{n=1}^{m-2} \Phi_{dn} \cdot w_{dn} + \Phi_{d3} \cdot w_{d3} - \Phi_{d4} \cdot w_{d4}.$$

Если учесть, что $\Phi_{d3}=\Phi_{d4}$, и раскрыть w_{d3} и w_{d4} через w_0 и показанные на рис. 5.7, *б* длины участков, то суммарное потокосцепление потоков Φ_{d3} и Φ_{d4}

$$\psi_{d34}=\Phi_{d3}\cdot w_{d3}-\Phi_{d4}\cdot w_{d4}=\Phi_{d3}\cdot(l_{d4}+l_{d3}/2)\cdot w_0-\Phi_{d4}\cdot l_{d4}\cdot w_0/2=$$
$$=\Phi_{d3}\cdot(l_{d4}+l_{d3})\cdot w_0/2=\Phi_{d3}\cdot w_{d34}, \qquad (5.2)$$

w_{d34} — число витков, охваченное контуром $\Phi_{d3}=\Phi_{d4}$ на рис. 5.7, *в*.

Результат соответствует рис. 5.7, *в*, который получается из рис. 5.7, *б* простым отбрасыванием тех частей контуров потоков рассеяния Φ_{d3} и Φ_{d4}, в которых они равны и направлены в противоположные стороны. Расчет потокосцепления контура Φ_{d3} (или Φ_{d4} — фактически это один и тот же поток) по (5.2) не вызывает сомнений. То же самое делает и оператор (13) подпрограммы Fu Приложения 12, используя понятия условно-положительных направлений величин.

Расчет электромагнитных сил проводится для каждого положения якоря для каждой из назначенных циклом FOR...NEXT подпрограммы Fl.F МДС F оператором (16) по формуле Максвелла, в которую подставляются торцевые потоки (то есть так, как это делалось в программе DC [2] при расчете и построении статической тяговой характеристики электромагнита). Учитываются силы в каждом из двух зазоров, в левом зазоре они приводятся к оси сердечника (правого зазора).

5.3. Преобразование статической механической характеристики

(см. также п. 2.6 и 2.7 документа DUON.mcd — Приложение 14)

На рис. 5.8 приведены статическая тяговая (ломаная линия) и механическая характеристики электромагнита, которые строит QB-программа DU. Площадь, ограниченная механической характеристикой сверху, осью абсцисс снизу и двумя крайними вертикальными линиями слева и справа, на рис. 5.8 затемнена. По оси абсцисс отложена длина рабочего зазора L2 (так она обозначается в программе DU). Координаты точек этих характеристик сначала выводятся в файл Pu.dat модулем DU2 QB-программы DU (см. п. 2.7.2 Приложения 12), затем читаются рабочим документом DUON.mcd в п. 2.6 и, наконец, изображаются в виде зависимостей статических электромагнитной и механической сил от перемещения vx на рис. 11 этого документа. Ломаной сплошной линией показана на нем статическая тяговая, а штриховой — статическая механическая характеристики. С дополнительными обозначениями, но с сохранением типов линий (сплошная — электромагнитная, штрихи — механическая) эти графики повторены

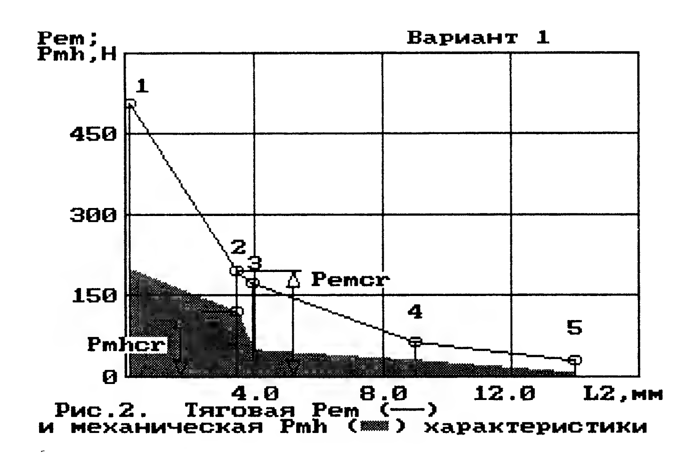


Рис. 5.8. Характеристики, построенные QB-программой DU. Обрабатываются в рабочем документе DUON.mcd

на рис. 5.9. На нем, в частности, прямыми арабскими цифрами показаны номера положений якоря, соответствующие некоторой дискретной переменной n, используемой в документе DUON для обозначения порядкового номера положения якоря.

Обратим внимание на то, что в QB-программе DU положения якоря нумеруются от 1-го до 5-го, а в MCAD-документе — от 0-го до 4-го (переменная n изменяется от 0 до N; N=4 в рассматриваемом в Приложении 14 варианте 1 расчета). Важно также учесть, что направления отсчета в QB-программе — от малых зазоров к большим, а в MCAD-документе — от малых перемещений (а не зазоров) к большим. Последнее соответствует направлению отсчета от больших зазоров к меньшим, т. е. противоположно принятому в QB-программе. Таким образом, положение якоря с номером 0 в MCAD-документе (при x=0 и силе $Pmhst_0$, на рис. 5.9 эта точка обозначена также буквой а) соответствует положению якоря 5 в QB-программе (рис. 5.8), а положение якоря с номером N=4 в MCAD-документе (эта точка

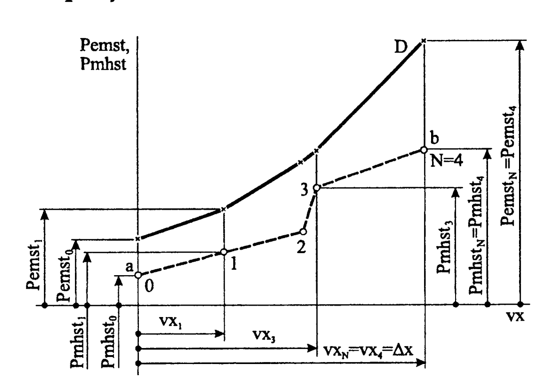


Рис. 5.9. Статические тяговая (сплошная) и механическая (штриховая) характеристики, координаты точек которых выводятся в файл QB-программой DU

обозначена также буквой b на рис. 5.9) соответствует положению якоря с номером 1 в QB-программе (рис. 5.8).

MCAD не принимает механических характеристик с вертикальными участками, так как их бесконечно большая жесткость приводит к перегрузке компьютера. Исходная характеристика фактически предполагала наличие двух вертикальных участков: при перемещении $x=0$ сила $Pmhst_0$ — это сила предварительного растяжения (или сжатия, или изгиба) возвратной пружины, которое воспринимается опорой якоря ОЯ (см. рис. 5.1) при отсутствии тока в обмотке; $Pemst_4 - Pmhst_4$ — сила реакции полюсного наконечника на давление со стороны якоря при $x=\Delta x$ при наличии тока в обмотке. Так как в природе абсолютно жестких опор не существует, то для расчета заменим их опорами с большой, но конечной жесткостью. Статическая механическая характеристика после такой замены (далее — новая) показана на рис. 5.10 штриховой линией. Арабские цифры без скобок, написанные курсивом, обозначают порядковые номера показанных кружками точек новой статической механической характеристики (абсциссы этих точек собраны в п. 2.7 документа DUON.mcd в векторе перемещений xj, ординаты — в векторе механических сил Pmh1). Прямые арабские цифры в круглых скобках показанных кружками точек (1), (2), (3) штриховой линии, а также точек (0) и ($N=4$) рядом с ней — это номера точек механической характеристики до коррекции (далее — старой). Абсциссы ее собраны в п. 2.2 документа DUON в векторе перемещений vx, а ординаты — в векторе сил Pmhst (в п. 2.6 там же).

На рис. 5.10 арабскими цифрами 0, 1, 2, 3, 4 без скобок прямым шрифтом возле показанных крестиками точек обозначены также опорные точки плавной статической тяговой характеристики, которая получена в конце п. 2.6 документа DUON.mcd путем сплайн-интерполяции исходной, ломаной на рис. 5.9, линии (см. функцию $P_{emst}(x)$). В документе DUON эта интерполированная статическая тяговая характеристика построена штрих-пунктирной линией на рис. 35. Абсциссы опорных точек статической тяговой характеристики, показанной на рис. 5.9 и 5.10, находятся в векторе vx (см. п. 2.2 Приложения 14), а ординаты — в векторе Pemst (п. 2.6 там же).

Коррекция статической механической характеристики и определение координат ее новых точек осуществляются следующим образом.

Точка (0) старой механической характеристики (на рис. 5.10 она также обозначена буквой a) передвигается в точку *1* по горизонтали на перемещение $xj_1 = Pmhst_0/c_{j_0}$, где c_{j_0} — жесткость новой механической характеристики на участке *0 — 1*, моделирующая упругую деформацию опоры якоря ОЯ под действием предварительно растянутой (или сжатой, или изогнутой) возвратной

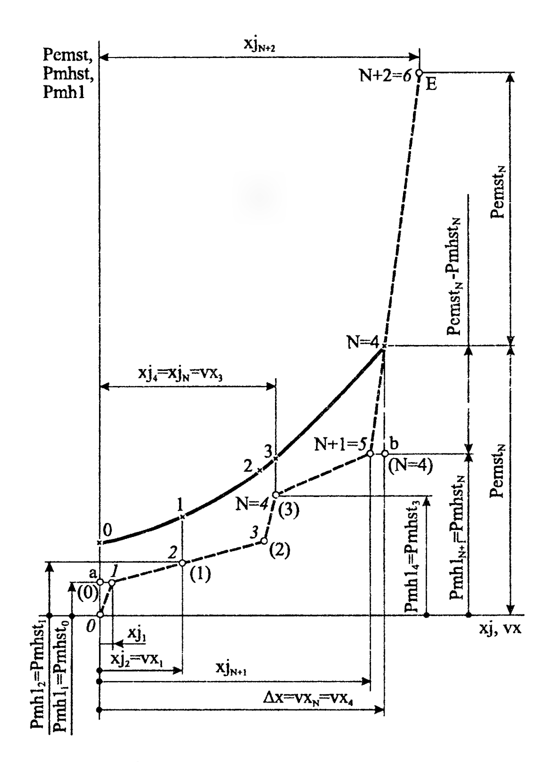


Рис. 5.10. Статическая механическая характеристика, скорректированная с учетом конечной жесткости ограничителей хода якоря (штриховая ломаная), и тяговая статическая характеристика (сплошная) после сплайн-интерполяции

пружины. Такой же принимается жесткость новой механической характеристики и при перемещениях $x<0$.

При передвижении точки (0) в точку *1* (рис. 5.10) при большой жесткости c_{j_0} участок старой механической характеристики практически будет иметь такой же наклон (жесткость), как и участок *1 — 2 — 3* новой характеристики. Иными словами, жесткость возвратной пружины, которая работает при этих перемещениях якоря, практически не изменяется.

С использованием описанного преобразования механической характеристики легко объяснить статическое равновесие якоря при обесточенной катушке (и при отсутствии силы веса якоря) в точке *0*, в которой и перемещение, и сила равны нулю, а усилие предварительного сжатия (или растяжения, или изгиба) возвратной пружины компенсируется упругой деформацией опоры якоря на длине хода якоря xj_1 (см. рис. 5.10). Нагрузка с опоры якоря снимается в точке *1* этой характеристики.

Точка (N=4) старой механической характеристики (на рис. 5.10 она обозначена также буквой b) передвигается по горизонтали влево до точки с номером N+1=*5*. Абсцисса точки *5* определяется по формуле $x_{j_{N+1}}=\Delta x-(Pemst_N-Pmhst_N)/c_{jp}$. Здесь $Pemst_N$ и $Pmhst_N$ — значения статических электромагнитной и механической сил по исходным статическим характеристикам (см. рис. 5.9 и 5.10) при притянутом якоре; c_{jp} — жесткость новой механической характеристики при всех перемещениях $x>xj_{N+1}$ (см. рис. 5.10); Δx — полный ход якоря, определяемый по формуле $\Delta x=\delta_{max}-\delta_{min}$, где δ_{max} —

длина максимального рабочего зазора; δ_{min} — длина рабочего зазора при притянутом якоре.

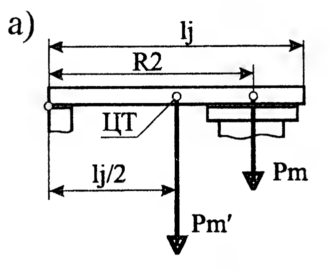
На рис. 5.10 показан участок этой характеристики вплоть до точки с номером N+2=*6*, обозначенной также буквой E. Ее ордината принята равной $2 \cdot Pemst_N$, а абсцисса $xj_{N+2} = \Delta x + Pemst_N/c_{jp}$. Такой участок новой механической характеристики обеспечивает при токе в обмотке статическое равновесие якоря в положении, при котором перемещение равно Δx, а сила равна $Pemst_N$ (точка N=4 пересечения статических тяговой и новой механической характеристик на рис. 5.10 и точка D на рис. 5.9).

5.4. Приведение силы веса якоря к оси сердечника (см. также п. 2.5 Приложения 14)

На рис. 5.11 показан якорь электромагнита в притянутом (*а*) и отпущенном (*б*) положениях. Сила веса якоря приложена в центре его тяжести ЦТ и равна Pm′. Приведенную к оси сердечника, т. е. к плечу R2, силу

$$Pm = Pm' \cdot lj/2/R2 \qquad (5.3)$$

QB-программа DU определяет в строке (10) Приложения 12. Этим можно было бы и ограничиться. Однако при максимальном угле поворота якоря, когда сила его веса становится соизмеримой со статической механической (в рассматриваемом числовом примере Pm=2.985 Н, а статическая сила при отпущенном якоре $Pmhst_0 = 8$ Н), действительное значение силы веса несколько меньше определенного по (5.3) и зависит от угла поворота α якоря, а значит, и от перемещения x: $P_m(x) = Pm \cdot \cos\alpha$, где $\alpha = (\Delta x - x)/R2$. В рабочем документе DUON.mcd учитывается это уточнение (см. п. 2.5 Приложения 14). Заметим, что при приведении силы веса якоря Pm к оси сердечника в строке (10) QB-программы DU предполагается равенство моментов сил, создаваемых относительно оси поворота якоря, а при расчете приведенной к оси сердечника массы Mj якоря по (9) предполагается равенство моментов инерции масс относительно той же оси поворота. Поэтому в первом случае приведенная



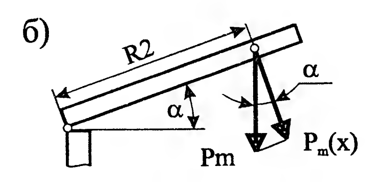


Рис. 5.11. Якорь электромагнита в притянутом (*а*) и отпущенном (*б*) положениях

сила пропорциональна отношению плеч в 1-й степени, а во втором — во 2-й степени. Если по конструкции якорь не является прямоугольным параллелепипедом, как принято в QB-программе DU при расчете Pm и Mj (см. также рис. 10.2 [2] и рис. 5.1, *а* настоящей работы), то в рабочем документе DUON.mcd их реальные величины нужно уточнить, присвоив новое значение массы переменной M после строки (4) п. 2.1 Приложения 14 и новое значение силы веса якоря переменной Pm после строки (5) там же. Если в этом будет необходимость, то надо уточнить также функцию $P_m(x)$ ниже ее старого значения в п. 2.5 рабочего документа DUON. То же самое необходимо сделать и в том случае, если ориентация электромагнита в пространстве, например, как на рис. 5.1, *в* (не якорем вверх, принятой в документе DUON), а также в случае, если с якорем жестко связаны элементы конструкции, масса которых соизмерима с массой якоря, например, как на рис. 5.1, *б*.

5.5. Зависимость силы сухого трения от скорости при скоростях, близких к нулю (см. также п. 2.9 Приложения 14)

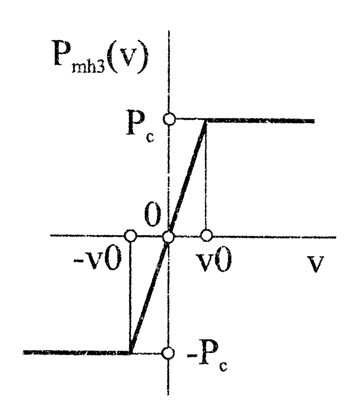


Рис. 5.12. Зависимость силы сухого трения от скорости при скоростях, близких к нулю

Эта зависимость показана на рис. 5.12, который фактически повторяет рис. 15 Приложения 14 с дополнительными обозначениями. На рис. 5.12 P_c — сила сухого трения, которая вводится пользователем в DUON.mcd в п. 2.1, v0 — правая граница особого участка функции зависимости силы сухого трения от скорости $P_{mh3}(v)$, которая определяется по формуле $v0 = P_c/c_c$, где c_c — жесткость этого участка в Н/(м/с), вводимая пользователем в п. 2.1 документа DUON.mcd.

5.6. О влиянии вихревых токов в магнитопроводе на процесс включения электромагнита

Вихревые токи в магнитопроводе, начиная с момента включения электромагнита, создают поток, направленный, по закону Ленца, навстречу возрастающему в это время основному потоку, созданному обмоткой. Таким образом, они тормозят нарастание суммарного потока, который создает электромагнитную силу, дей-

ствующую на якорь. Процесс изменения токов и потокосцеплений при включении электромагнита постоянного тока до начала движения якоря аналогичен переходному процессу включения двухобмоточного воздушного трансформатора на неизменное во времени напряжение, изученному в п. 4.3.1. Сами вихревые токи подобны токам, возникающим во вторичной обмотке этого трансформатора.

Вихревые токи замедляют нарастание потока аналогично тому, как сила механического демпфирования $P_{mh2}(x, v)$ тормозит движение якоря, однако если последняя увеличивается пропорционально скорости перемещения якоря, то сила, создаваемая вихревыми токами, нарастает с увеличением скорости изменения потока. Эта сила зависит от квадрата потока, созданного вихревыми токами, а поток является функцией не только значений самих вихревых токов, но и суммарной магнитной проводимости системы, зависящей от положения якоря электромагнита. При существенных вихревых токах процессы изменения величин во времени, показанные на графиках документа DUON, замедляются.

Метод расчета процесса включения, описанный в Приложении 14, в наибольшей степени подходит для быстродействующих электромагнитов, в которых приняты специальные меры для уменьшения вихревых токов.

Раздел третий

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ

График функции — кривая, дающая наглядное представление о характере изменения функции. График функции y=f(x) состоит из точек, абсциссы которых равны значениям независимой переменной x, а ординаты — соответствующим значениям y. Предполагается, что в заданном диапазоне изменения x функцию y можно определить при любом x.

Диаграмма — один из способов графического изображения зависимости между величинами; чертеж, на котором данные изображаются при помощи системы геометрических фигур. Для ее построения используются линии, плоскости, объемные геометрические тела и трехмерные поверхности.

В соответствии с вышеприведенными определениями, взятыми из Малой советской энциклопедии, график функции является особым случаем более общего понятия «диаграмма». В современной литературе часто термин «график» (без добавления слова «функ-

ции») используется как синоним понятия диаграмма (см., например, [3, 4]), хотя некоторые отличия в этих терминах все же имеются. Слово «диаграмма» более характерно для книг по статистике, экономике; термины «график» и особенно «график функции» — для научно-технической и математической литературы. Диаграммы, как правило, оформляются более красочно, чем графики. На диаграммах принято делать поясняющие надписи. Графики обычно выглядят более лаконично. Далее будем использовать оба этих слова («графики» и «диаграммы»), отдавая предпочтение слову «график» в гл. 6 и слову «диаграмма» в гл. 7.

Графики наглядно показывают функциональные связи самых разных величин. В науке и технике особый интерес представляет изображение на графиках результатов исследований и расчетов. Необходимость в построении графиков была всегда. Актуальна она и сейчас.

До появления графических режимов работы мониторов ЭВМ приходилось строить графики вручную с помощью нехитрых приспособлений в виде лекала и линейки. По мере совершенствования мониторов возникла возможность построения графиков в DOS-программах на таких универсальных алгоритмических языках программирования, как QB [2], С, Паскаль и др. Однако необходимость в программировании графиков сдерживала внедрение в технику наглядного представления результатов работы программ, написанных на языках этого поколения. Чуть позже появления универсальных алгоритмических языков программирования на рынке компьютерного обеспечения возникли DOS-программы, позволяющие строить графики в интерактивном режиме (например, Eureca фирмы Borland). Но настоящая революция в этой области произошла в результате внедрения операционных графических оболочек и операционных графических систем.

В настоящее время в проектных, научно-исследовательских и учебных организациях скопилось достаточно много вполне работоспособных DOS-программ, которые выполняют нужные расчеты, но результаты выводят в ненаглядном текстовом виде, требующем последующей расшифровки. При небольшой доработке, которая заключается не в программировании графиков, а в выводе в текстовые файлы результатов работы рассматриваемых устаревших DOS-программ, можно продлить последним жизнь, так как современные компьютерные технологии позволяют строить графики с использованием данных, вводимых не только с клавиатуры, но и из текстовых файлов, созданных другими программами.

Примеры построения графиков в системе MCAD по данным файлов, созданных QB-программами, приведены во втором разделе настоящей работы. В интерактивном режиме их можно построить во многих Windows-программах, в том числе в системе электронных таблиц Excel [22, 28]; в программе Corel Chart [26]; в программах

корпорации Microsoft, имеющих встроенную утилиту MSGraph построения диаграмм [21, 27], например, в широко распространенном текстовом процессоре Word для Windows. Обязательным условием для их использования является наличие на компьютере системы Windows версии не ниже 3.1.

Все эти, а также многие другие системы позволяют строить диаграммы самых разных типов, в том числе и трехмерные. Одно перечисление их названий заняло бы несколько строк текста. Пользователю порой бывает трудно разобраться, какой тип графика предпочесть. Дополнительные проблемы создает также разнобой в их терминологии, имеющийся как в книгах, так и в русскоязычных вариантах справки различных программ построения графиков. При выборе типа графика надо учесть следующие обстоятельства: многие требуют для правильного построения равномерного шага изменения хотя бы одного из аргументов, что часто не имеет места; трехмерные, несмотря на их внешнюю привлекательность, не всегда наглядны и понятны; некоторые типы графиков не позволяют отображать значения таблиц-матриц.

В Приложении 14 читатель уже познакомился с графиками в виде трехмерных поверхностей (см. рис. 4 и 9) и в виде карт линий уровня (см. рис. 5 и 10). Самый распространенный тип графика в технике — график функции одного аргумента в ортогональной системе координат. Настоящая работа в этом смысле не является исключением. Для функции двух аргументов наиболее понятным можно считать график параметрических кривых, с которым читатель уже познакомился по рис. 2, 3, 7 и 8 Приложения 14. График функции одного аргумента является частным случаем графика параметрических кривых.

В гл. 6 рассматриваются и строятся графики в виде точек, соединенных прямыми. Получившаяся при этом ломаная линия далее называется *кривой*, а точки, которые соединяются прямыми,— *опорными точками*. При построении каждой кривой некоторой серии вводятся обе координаты каждой точки, расстояние между абсциссами соседних точек может быть разным. Одна кривая от другой отличается по значению параметра, поэтому такие кривые называются *параметрическими*. Шаг по параметру может быть разный. Такие графики при построении с помощью инструмента BPS [23] в системе Visual Basic (далее VB) [20] называются *линейными* (*linear*), в MSGraph 3.0b — *точечными* (*XY*) [21], в MCAD — *декартовыми* [3] (*XY Plot* в подлиннике [4]); в Excel 7 [22], Excel 97 [28] и MSGraph 97 [27] — *точечными*. Во всех версиях Excel, начиная по крайней мере с 5-й, а также в MSGraph 97 [27] опорные точки можно соединять не только прямыми, но и плавными кривыми линиями. Такие графики рассматриваются в гл. 7. В MCAD их тоже можно строить, но после предварительной сплайн-интерполяции (см. п. 3.1).

Между графиком в виде опорных точек, соединенных прямыми или плавными линиями, и графиком функции имеется некоторое отличие. Предполагается, что функция определена при любом значении x, тогда как ординаты кривой в виде опорных точек, соединенных прямыми или плавными линиями, в промежутках между опорными точками могут быть не известны. С этой точки зрения, название «точечная диаграмма», присвоенное этому типу графика в русскоязычной литературе по программным продуктам корпорации Microsoft, является обоснованным.

Технология построения графика обычно требует представления данных в виде таблицы, элементы которой занимают строго определенные места. Таблица сама по себе уже способствует повышению наглядности. В гл. 6 рассматривается создание таблиц и построение графиков с помощью программы G&G, специально разработанной для этого в среде VB. Достоинствами этой программы являются ее универсальность, наглядность, простота, быстрота получения результата. В гл. 7 рассматривается создание таблиц и построение графиков в системах Excel 97 [28] и Word 97 [29].

Глава 6

ПРОГРАММА G&G НА VISUAL BASIC

Для исполнения этой программы в среде VB необходимо наличие на компьютере операционной оболочки Windows версии 3.1 (или 3.11) и VB 3 в профессиональной редакции. VB 3 в стандартной редакции тоже можно использовать, но при дополнительной установке в директорию C:\WINDOWS\SYSTEM файла GRAPH.VBX построения графиков и диаграмм [23], который в США курируется фирмой Pinnacle Publishing Inc. Этот инструмент вошел в профессиональную редакцию, по крайней мере, VB 5 [24], но, к сожалению, не является частью предпринимательских (Enterprise) редакций VB 5 и VB 6.

Для исполнения программы G&G в более высоких, чем 3-я, версиях VB необходимо убедиться в том, что инструмент Сетка имеет те же свойства, что и Grid Custom Control (Copyright 1991 — 1993 Microsoft Corporation, с участием фирм Thuridion Software Engineering и Applegate Software).

Для исполнения exe-файла G&G необходимо наличие на компьютере графической оболочки Windows версии 3.1 (или 3.11); кроме того, в директории WINDOWS\SYSTEM должны находиться файлы: GRAPH.VBX, GRID.VBX, CMDIALOG.VBX, MSOLE2.VBX и VBRUN300.DLL. При этом нет нужды в самом VB, а запуск обсуждаемой программы можно осуществить, если после выделения g&g.exe в панели Norton Commander нажать (и отпустить)

клавишу [Enter]. Из оболочки Windows она запускается более надежно: либо через меню **Файл — Выполнить** Диспетчера программ, либо через Диспетчер Файлов двойным щелчком на строке с именем g&g.exe.

6.1. Файлы данных

Файлы данных, на базе которых далее ведется объяснение работы программы G&G, приведены в Приложении 15. Все они должны располагаться в той же директории, что и g&g.exe (или vb.exe, если запуск на исполнение осуществляется в среде VB). Для получения возможности сопоставления кривых G&G с аналогичными кривыми, построенными QB-программой DU (рис. 5.2) и рабочим документом DUON (рис. 2 и 3 Приложения 14), все файлы данных Приложения 15 сформированы на основе файлов xPsiu, iu, Flwu и Pu Приложения 13 путем простого изменения последних в текстовом редакторе. Некоторые способы создания файлов данных, читаемых системой MCAD, описаны в Приложении 20. Напомним читателю, что число кривых и число опорных точек каждой кривой вводятся пользователем в QB-программе DU, создающей исходные файлы данных (xPsiu, iu, Flwu и Pu) путем ввода числа положений якоря электромагнита и числа значений тока в обмотке, для которых QB-программа проводит расчет потокосцеплений. Чтобы не перегружать рисунки G&G, число кривых и опорных точек на каждой кривой при редактировании исходных файлов было уменьшено. В результате этих изменений программа G&G при загрузке данных из файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat строит 3 кривых, а не 5, которые строятся на рис. 5.2 и рис. 2 рабочего документа DUON по данным файлов xPsiu.dat, iu.dat и Flwu.dat. С использованием файлов ab1.dat, par1.dat, or1.dat и abt.dat, part.dat, ort.dat кривые строятся по 7 опорным точкам, а не по 13, как с помощью xPsiu, iu, Flwu. При загрузке данных из файлов ab2.dat, par2.dat, or2.dat программа строит две кривые.

Файлы ab1.dat, par1.dat, or1.dat созданы для того, чтобы показать, что описываемая в гл. 6 программа G&G имеет универсальный характер и пригодна для построения не только серии параметрических кривых, но и одной кривой. Необходимость в создании этой группы файлов данных вызвана тем, что, хотя одна кривая и является частным случаем серии параметрических кривых, построение ее обладает некоторыми особенностями, о которых будет сказано позднее в этой главе.

Порядок некоторых чисел файлов Приложения 15 отличается от порядка этих чисел в Приложении 13 в связи с изменением единиц измерения перемещений и токов. Ниже описаны конкретные изменения, сделанные в исходных файлах Приложения 13. Так, элементы

ab3.dat (Приложение 15) со значениями тока обмотки в mA больше в 10^3 раз, чем соответствующие элементы iu.dat (Приложение 13) со значениями тока в А. Элементы par3.dat Приложения 15 представляют собой перемещения якоря электромагнита в мм, поэтому они больше в 10^3 раз, чем соответствующие перемещения в метрах, имеющиеся в левом столбце файла xPsiu.dat (Приложение 13). Кроме того, в par3.dat оставлены только числа из первого, третьего и пятого рядов левого столбца файла xPsiu.dat, что равноценно 1-му, 3-му и 5-му положениям якоря из имеющихся в файле xPsiu.dat. По этой же причине в файл or3.dat вошли только 1-я, 3-я и 5-я строки файлов Flwu.dat значений потокосцеплений. Файл abt.dat полностью совпадает с par3.dat, а файл part.dat — с ab1.dat. Оба последних получены из ab3.dat исключением 2-го, 4-го, ..., 12-го элементов. Аналогичным образом из файла or3.dat получен файл ort.dat — в каждой строке последнего отсутствуют элементы 2-й, 4-й, ..., 12-й файла or3.dat. Файл or1.dat содержит только среднюю строку файла ort.dat. Файл ab2.dat представляет собой столбец файла xpsiu.dat (Приложение 13), положенный на бок (он состоит из пяти перемещений якоря электромагнита); файл par2.dat — это любые два числа, которые в программе G&G будут заменены текстом; файл or2.dat — это транспонированная матрица файла pu.dat, состоящего из электромагнитных (левый столбец) и механических (правый столбец) сил. В файле or2.dat значения механических сил расположены в нижней строке, электромагнитных — в верхней. Комплект двух файлов данных предназначен для построения кривых другого типа, нежели комплекты файлов 1, 3 и t. Подробнее об этом будет сказано при объяснении рис. 6.12.

Программа G&G требует загрузки исходных данных из трех файлов, даже если строится одна кривая и в одном из файлов находится всего одна цифра, как в par1.dat. Для упрощения запоминания номеров комплектов принято такое их обозначение, при котором цифры в именах файлов данных показывают число кривых, которые строятся на одном графике. Так, после загрузки комплекта ab3.dat, ..., or3.dat строятся три кривых. Этот комплект принят основным при дальнейшем объяснении работы программы.

6.2. Состав программы и особенности ее работы

Листинг программы с достаточно подробными комментариями приведен в Приложении 16. Состав ее показан в основной части файла проекта G&G.MAK, приведенной в начале Приложения 16 (точками показаны опущенные строки этого файла). Как видно из G&G.MAK, программа состоит из четырех стандартных файлов инструментов с расширением VBX, семи файлов форм с расширени-

ем FRM и одного модуля с расширением BAS. Порядок следования файлов в Приложении 16 принят совпадающим с их порядком расположения в МАК-файле.

Имена форм, использованных в программе G&G, приведены в табл. 1 Приложения 17. Названия инструментов (объектов) каждой из форм, их имена (name) и надписи (caption) сведены в табл. 2 — 6 того же приложения с соблюдением того же порядка следования этих таблиц, что и файлов в G&G.MAK в начале Приложения 16. Соответствие русских терминов, использованных в гл. 6 и Приложении 16, английским приведено в табл. 7 и 8 Приложения 17.

Результаты работы программы представлены на рис. 6.1 —6.17. На пяти последних показаны все пять окон справки о работе с программой, повторяющие содержательную часть текста, выводимого на формы frmHLP1 — frmHLP5 операторами PRINT файлов HLP1.FRM — HLP5.FRM. Так как последние, с точки зрения программирования, особого интереса не представляют и похожи друг на друга, то в Приложении 16 полностью приведен листинг только HLP1.FRM.

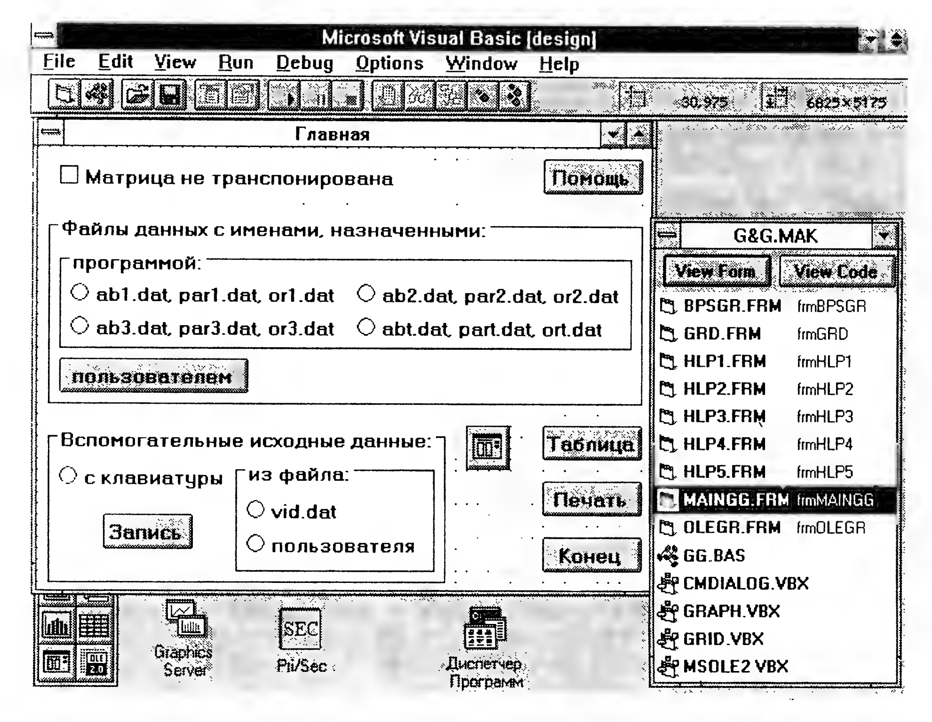
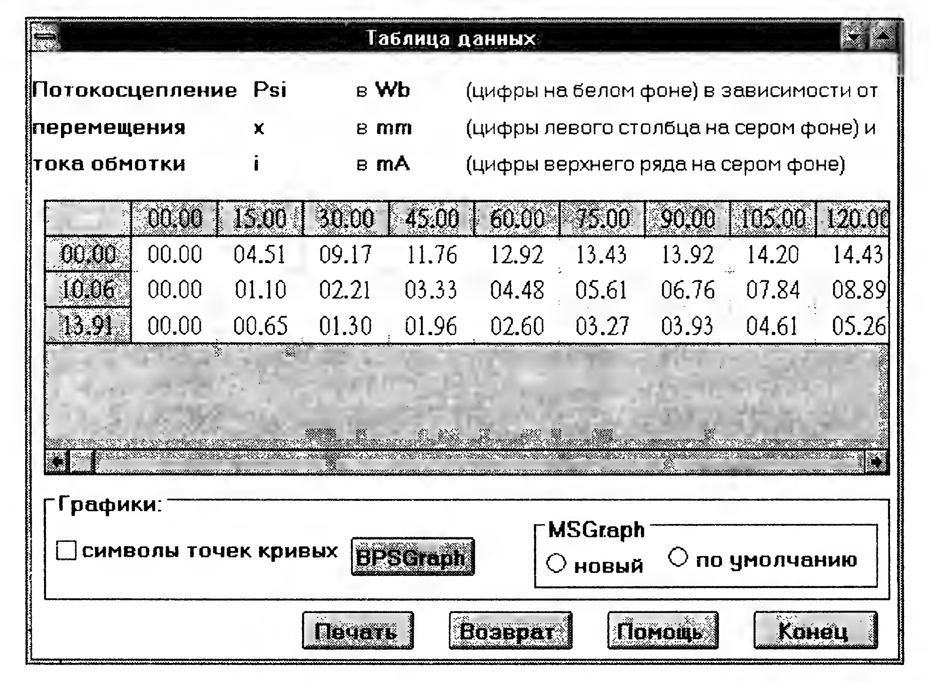


Рис. 6.1. Экран VB 3 в режиме проектирования с формой **Главная**, окном проекта G&G. MAK, строкой инструментов (ToolBar) и столбцом инструментов (ToolBox), выглядывающим слева снизу из-под формы



	00.00	15.00	30.00	45.00	60.00	75.00	90.00	105.00	120.00
00.00	00.00	04.51	09.17	11.76	12.92	13.43	13.92	14.20	14.43
10.06	00.00	01.10	02.21	03.33	04.48	05.61	06.76	07.84	08.89
13.91	00.00	00.65	01.30	01.96	02.60	03.27	03.93	04.61	05.26

Рис. 6.2. Форма Таблица данных в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat

Изучение работы с программой G&G следует начинать с чтения текста на рис. 6.13 — 6.17.

Окно приложения VB периода проектирования (design) программы G&G показано на рис. 6.1. В верхней части — строка заголовка приложения с кнопкой системного меню в левом углу и кнопками регулирования размеров окна в правом; ниже — строка основного меню, под которым — кнопки строки инструментов (ToolBar). Центральную и левую части экрана монитора занимает окно формы **Главная**, а правую — окно проекта с именем G&G.MAK. В нижней открытой части вертикального окна инструментов (ToolBox), большая часть которого закрыта окном формы **Главная**, видны четыре кнопки, соответствующие файлам VBX. Слева направо и сверху вниз эти инструменты называются: График (GRAPH.VBX), Сетка (GRID.VBX), Стандартное окно диалога (CMDIALOG.VBX) и инструмент связи и внедрения объектов (MSOLE2.VBX). Файлы VBX занимают четыре нижних строки файла проекта окна G&G.MAK (рис. 6.1). При загрузке MAK — файла, содержащего инструмент GRAPH.VBX, автоматически на экран выводится также пиктограмма Graphics Server в виде двух графиков — ломаной кривой и столбчатой диаграммы (рис. 6.1). На форме **Главная** периода проектирования всю площадь, не занятую инструментами, покрывают

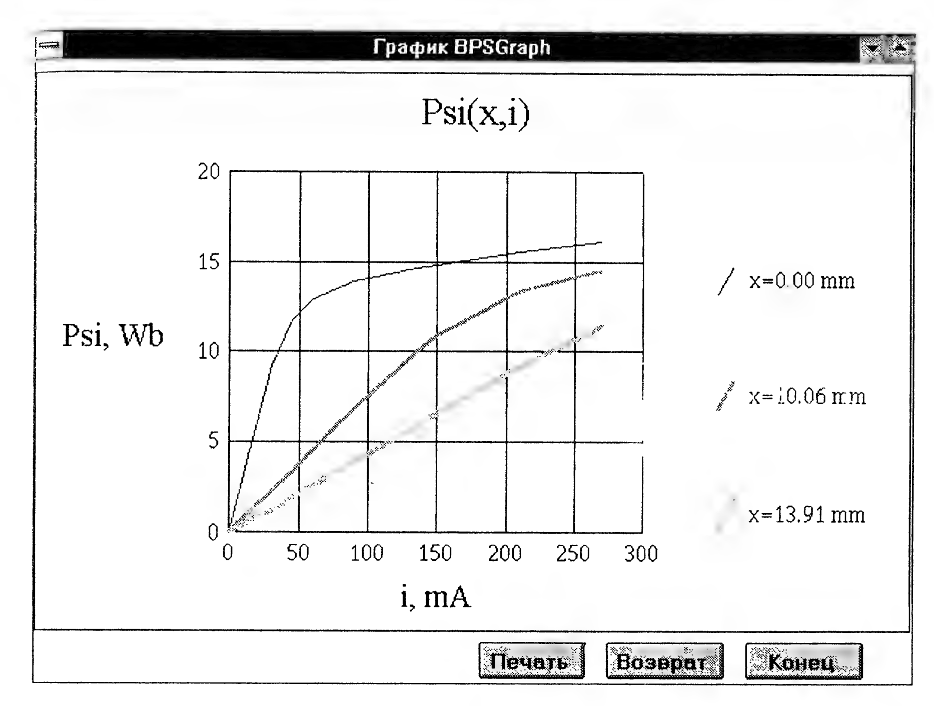


Рис. 6.3. Форма **График BPSGraph** в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat

точки, а слева от кнопки **Таблица** видна пиктограмма инструмента **Стандартное окно диалога**. Точки и эта пиктограмма отсутствуют в окне формы **Главная** во время исполнения программы.

6.3. Графики, построенные с помощью инструмента BPSGraph

Рассмотрим результаты работы программы G&G по рис. 6.2 — 6.12. На рис. 6.2, 6.4 и 6.6 над таблицей три строки формируют заголовок. Эти строки надо читать непрерывно сверху вниз и слева направо, не обращая внимания на большие пробелы между словами, обозначениями и размерностями. Полужирным шрифтом в заголовке показаны переменные текстовых полей, которые можно заменить с клавиатуры в процессе исполнения программы. Пробелы между переменными резервируют места для более длинных слов. В таблице на рис. 6.2 видно повторение цифр файлов комплекта 3 с округлением до второго десятичного знака включительно. Цифры на белом фоне — данные файла or3.dat (см. Приложение 15), цифры левого столбца на сером фоне повторяют par3.dat, а цифры верхнего ряда на сером

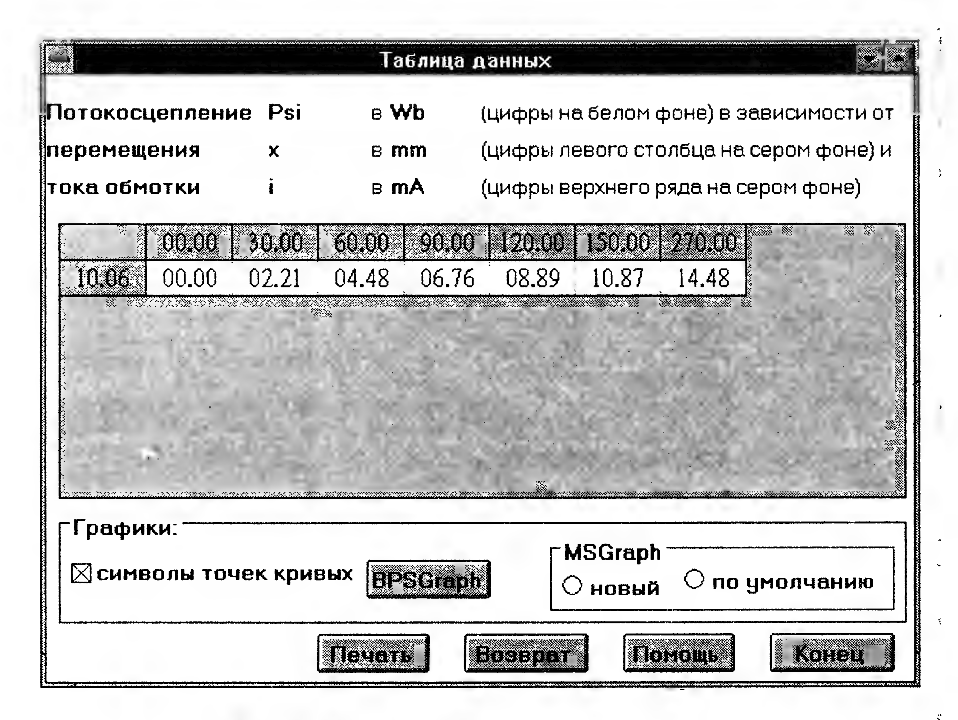


Таблица данных

Потокосцепление	Psi	в Wb	(цифры на белом фоне) в зависимости от
перемещения	x	в mm	(цифры левого столбца на сером фоне) и
тока обмотки	i	в mA	(цифры верхнего ряда на сером фоне)

	00.00	30.00	60.00	90.00	120.00	150.00	270.00
10.06	00.00	02.21	04.48	06.76	08.89	10.87	14.48

Графики:

☒ символы точек кривых BPSGraph

MSGraph: ○ новый ○ по умолчанию

Печать Возврат Помощь Конец

Рис. 6.4. Форма Таблица данных в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов ab1.dat, par1.dat, or1.dat

фоне — ab3.dat. Так как ширина серого прямоугольника, построенного на форме **Таблица данных** инструментом Сетка, недостаточна для размещения всех элементов файлов ab3 и or3, инструмент Сетка в нижней части этого серого прямоугольника автоматически генерирует горизонтальную линейку прокрутки. Переместив указатель этой линейки направо, мы сможем увидеть столбцы данных файлов ab3 и or3, расположенные правее самого правого на рис. 6.2 столбца с цифрой 120.00 на сером фоне. При этом левые столбцы файлов ab3 и or3 (с заголовками 00.00, 5.00, ...) как бы исчезнут под самым левым столбцом таблицы с цифрами на сером фоне. Так как при прокрутке содержания таблицы самый левый столбец остается неподвижным, он называется фиксированным. Фиксированным называется также верхний ряд цифр на сером фоне, так как при прокрутке таблицы с помощью вертикальной линейки, которая автоматически возникла на рис. 6.6, он тоже остается неподвижным.

Цифры таблицы на рис. 6.2 соответствуют для токов (верхняя строка на сером фоне) вектору-строке vi п. 2.3 документа DUON (Приложение 14), для потокосцеплений (цифры на белом фоне) —

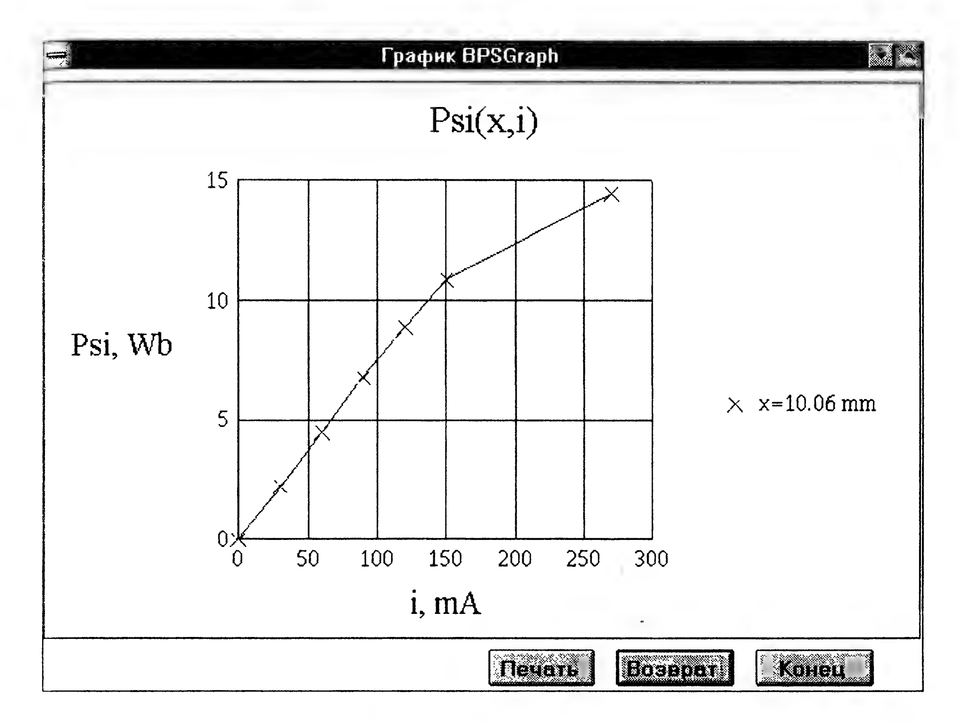


Рис. 6.5. Форма График BPSGraph в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов ab1.dat, par1.dat, or1.dat

матрице mFlw того же пункта без строк с номерами 1, 3 и правых столбцов (в п. 2.3 Приложения 14 показаны только 10 первых столбцов матрицы из 13), а для перемещений якоря (цифры левого столбца на сером фоне) — вектору-столбцу vx · 1000 п. 2.2 Приложения 14 без 2-й и 4-й строк. В последнем цифры показывают перемещения в мм, как и в таблице на рис. 6.2.

Кривые рис. 6.3 соответствуют кривым 1, 3 и 5 рис. 5.2. Только по оси абсцисс на рис. 6.3 ток откладывается в mA, а на рис. 5.2 — в A. Кривые Psi(x,i) на рис. 6.3 соответствуют также рис. 1 и 2 документа DUON (Приложение 14). Это сходство легче всего обнаружить, если, повернув рис. 6.3 на 90° против часовой стрелки, взглянуть на него на просвет с обратной стороны листа. Две крайние кривые рис. 6.3 соответствуют кривым рис. 1 Приложения 14, а три кривых рис. 6.3 соответствуют двум крайним и одной средней кривой рис. 2 этого приложения. Не надо, однако, забывать, что в Приложении 14 кривые построены с помощью аппроксимирующих функций, использующих сплайн-интерполяцию, а на рис. 6.3 — путем соединения опорных точек прямыми линиями, что равносильно линейной интерполяции. В таблице на рис. 6.4 видно

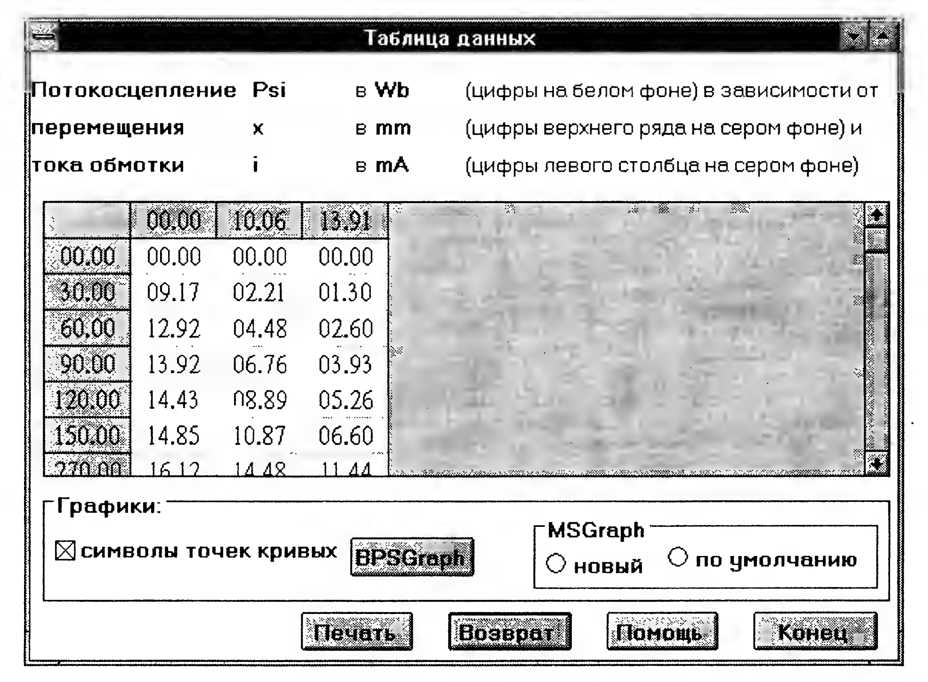


Рис. 6.6. Форма **Таблица данных** в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов abt.dat, part.dat, ort.dat

повторение средней строки табл. рис. 6.2, но с исключением 3-го, 5-го, ..., 13-го столбцов (если считать фиксированный столбец первым). Сравнение кривой рис. 6.5 со средней кривой рис. 6.3 показывает, что последняя, построенная по 13 опорным точкам, имеет более плавный вид. Левый столбец таблицы на рис. 6.6 соответствует вектору-столбцу vi^T п. 2.3 документа DUON (Приложение 14) без строк с номерами 1, 3, ..., 11, а матрица цифр на белом фоне — матрице $mFlw^T$ там же тоже без строк с теми же номерами. Рис. 6.7 не имеет аналога в Приложении 14 и гл. 5. Он просто демонстрирует возможности программы по транспонированию таблиц-матриц.

6.4. Графики, построенные с помощью утилиты MSGraph 3.0b

На рис. 6.8 — 6.12 показаны графики, построенные с помощью внедренной в программу G&G утилиты MSGraph 3.0b [21]. Воспользоваться возможностями этой утилиты в G&G можно только в том случае, если на компьютере имеется одна из программ фирмы Microsoft, составной частью которой является утилита MSGraph,

График BPSGraph

Psi(x,i)

Psi, Wb

20
15
10
5
0

0 5 10 15

x, mm

i=0.00 mA
i=30.00 mA
i=60.00 mA
i=90.00 mA
i=120.00 mA
i=150.00 mA
i=270.00 mA

Печать Возврат Конец

Рис. 6.7. Форма **График BPSGraph** в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов abt.dat, part.dat, ort.dat

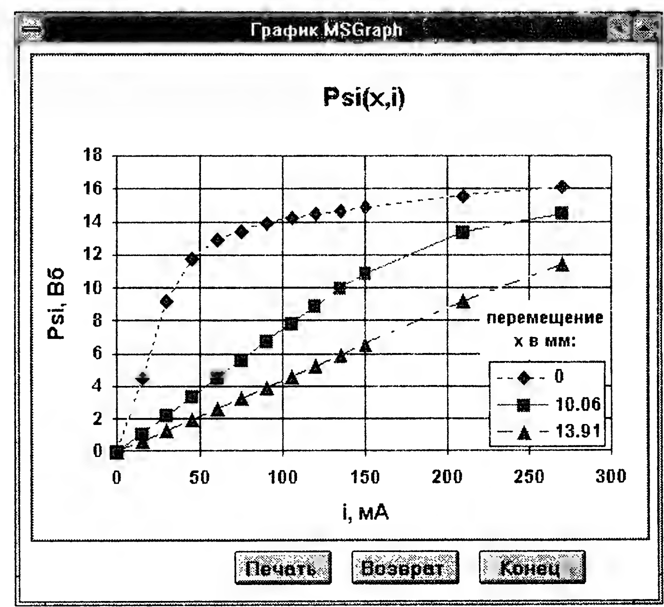


Рис. 6.8. Форма **График MSGraph** в режиме исполнения программы при загрузке основных данных из файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat

например, Word 6 для Windows. Необходимо также учесть, что инструмент OLE2 (Связь и внедрение объектов), использованный для построения MSGraph в программе G&G, предъявляет повышенные требования к оперативной памяти компьютера. Так, процессор Intel 386 с тактовой частотой 33 МГц и оперативной памятью 4 MB легко строил графики BPSGraph, но не мог построить графики MSGraph. Последние, как и первые, без проблем строил процессор Intel 486 с тактовой частотой 100 МГц и оперативной памятью 16 MB.

Программа G&G обеспечивает замену цифр окна **Таблица данных** MSGraph (на основе данных этой таблицы, примеры которой показаны на рис. 6.9, 6.11 и 6.12, строятся кривые графика MSGraph) цифрами сетки на форме **Таблица данных** программы G&G (примеры этой таблицы изображены на рис. 6.2, 6.4 и 6.6). Поэтому изменения, которые определяются основными исходными данными и влияют на кривые и масштабные цифры вдоль осей координат, а также цифры параметров в легенде, при построении как графиков BPSGraph, так и графиков MSGraph, учитываются

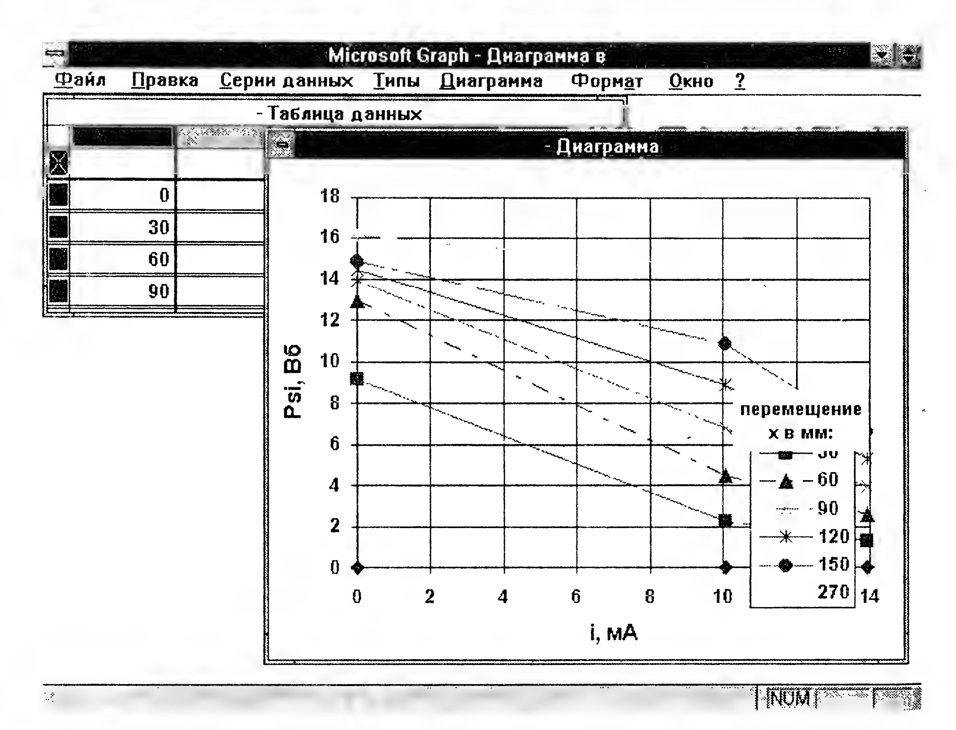


Рис. 6.9. Экран компьютера после загрузки основных исходных данных из файлов abt.dat, part.dat, ort.dat, нажатия кнопки **новый** внутри рамки MSGraph формы **Таблица данных** и двойного щелчка на графике

автоматически. Основное отличие графиков, построенных с помощью MSGraph, от построенных с помощью инструмента BPSGraph состоит в том, что у последних обозначения осей координат и размерностей отложенных на них величин (Psi, Wb и i, mA на рис. 6.3), обозначение параметра кривых и его размерности (x и mn) и заголовка (Psi(x,i)) меняются программно при изменении вспомогательных исходных данных. На графиках же MSGraph эти изменения необходимо делать в интерактивном режиме. Минимальным будет вмешательство пользователя в том случае, если он запишет новые обозначения осей координат, параметра, их размерности и заголовок графика в новом файле по умолчанию. На рис. 6.8 показан график, построенный нажатием кнопки **новый** (рис. 6.2) рамки MSGraph формы **Таблица данных** по исходным данным файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat и отредактированный в программе MSGraph (после двойного щелчка на графике). При редактировании изменены следующие установки по умолчанию:

1) Тип графика. Вместо столбчатой через меню **Типы** взята диаграмма **Точечная (XY)**, подтип 2 — символы точек соединены прямыми линиями, шкала по осям координат равномерная (не логарифмическая). Через меню **Диаграмма — Линии сетки** ... добавлены основные линии сетки по обеим осям координат.

2) Шрифт для обозначения масштабных цифр вдоль осей координат и цифр параметров легенды изменен с 8 пунктов на 10.

3) Через меню **Диаграмма — Заголовки...** введен заголовок графика (Psi(x,i)) шрифтом 14 пунктов.

4) Через меню **Диаграмма — Заголовки...** введены обозначения осей координат (Psi,Вδ и i, mA) шрифтом 12 пунктов.

5) Введен неприсоединенный текст («перемещение x в мм:») над легендой шрифтом 10 пунктов. Такой текст появляется в центре диаграммы при вводе его с клавиатуры, если перед этим не выделялся какой-либо присоединенный текст (заголовок диаграммы и заголовки оси значений (Y) и оси категорий (X)).

Перед редактированием какого-либо элемента графика этот элемент необходимо предварительно выделить. Тип и размеры шрифта любого элемента можно изменить через меню **Формат — Шрифт...**. Если после такой редакторской правки диаграммы, не выходя из MSGraph, щелкнуть на строке меню **Файл — Принять по умолчанию**, то после подтверждения пользователя график MSGraph, такой же, как во внутренней рамке рис. 6.8 (без кнопок), займет место рисунка, создаваемого файлом по умолчанию default.gra, и при загрузке MSGraph с помощью кнопки **по умолчанию** при любых исходных данных программа будет в точности его повторять.

Для выхода из среды утилиты MSGraph и возвращения в среду программы G&G с сохранением графика в отредактированном виде необходимо щелкнуть на строке **Выйти и вернуться в** меню **Файл**

и утвердительно ответить на вопрос диалога об обновлении графика. На рис. 6.8 показано это окончательное окно формы с отредактированным графиком и кнопками. Щелчком на кнопке **Печать** его можно тут же вывести на принтер. При этом будет напечатана растровая копия формы вместе с кнопками (будет повторен рис. 6.8). Если же щелкнуть на кнопке **Печать** форм на рис. 6.3, 6.5 и 6.7, выводимых инструментом BPSGraph, то на бумаге будет напечатано векторное изображение графика (более высокого качества) без изображения кнопок и обрамления формы.

Для построения графика по новым исходным данным, но в формате диаграммы по умолчанию надо щелкнуть не на кнопке **по умолчанию**, а на кнопке **новый**. Обе эти кнопки расположены внутри рамки MSGraph, например, на рис. 6.6. Такой график, построенный по исходным данным, введенным с помощью кнопки **abt.dat, part.dat, or.dat** (рис. 6.1) для построения графика по таблице рис. 6.6 с транспонированной матрицей, показан в окне **-Диаграмма** на рис. 6.9.

Сравнение окна **-Диаграмма** рис. 6.9 с рис. 6.7 показывает, что масштабные цифры вдоль осей координат, цифры параметров и сами кривые этих двух рисунков идентичны. Однако на графике рис. 6.9 перепутаны обозначение и размерность параметров в неприсо-

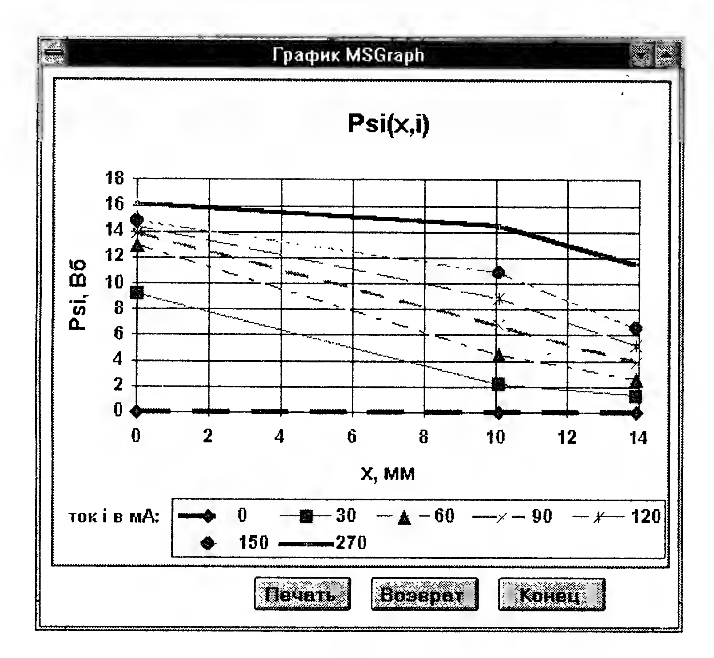


Рис. 6.10. Форма **График MSGraph** после редактирования графика в приложении MSGraph

единенном тексте над легендой и обозначение и размерность величины, откладываемой вдоль оси абсцисс, так как они просто взяты из рис. 6.8, принятого по умолчанию. Пользователь сам должен изменить эти величины. Почему-то из файла по умолчанию не передается заголовок графика — пользователь сам его должен ввести. Иными словами, для построения диаграммы MSGraph пользователь должен обладать некоторым навыком работы с этой утилитой.

После необходимой редакторской правки и выхода из утилиты MSGraph с помощью меню **Файл — Выйти и вернуться в** окно **Диаграмма** рис. 6.9 приобретает вид окна **График MSGraph**, показанного на рис. 6.10 (если положительно ответить на вопрос об обновлении).

Преимуществом построения графиков с помощью кнопки **BPSGraph** по сравнению с построением графика MSGraph является отсутствие необходимости какого-либо редактирования. Однако в графиках BPSGraph текст, введенный на русском языке, иногда искажается, поэтому размерности на рис. 6.3, 6.5 и 6.7 указаны на английском. Кроме того, инструмент Сетка (Grid) для ввода

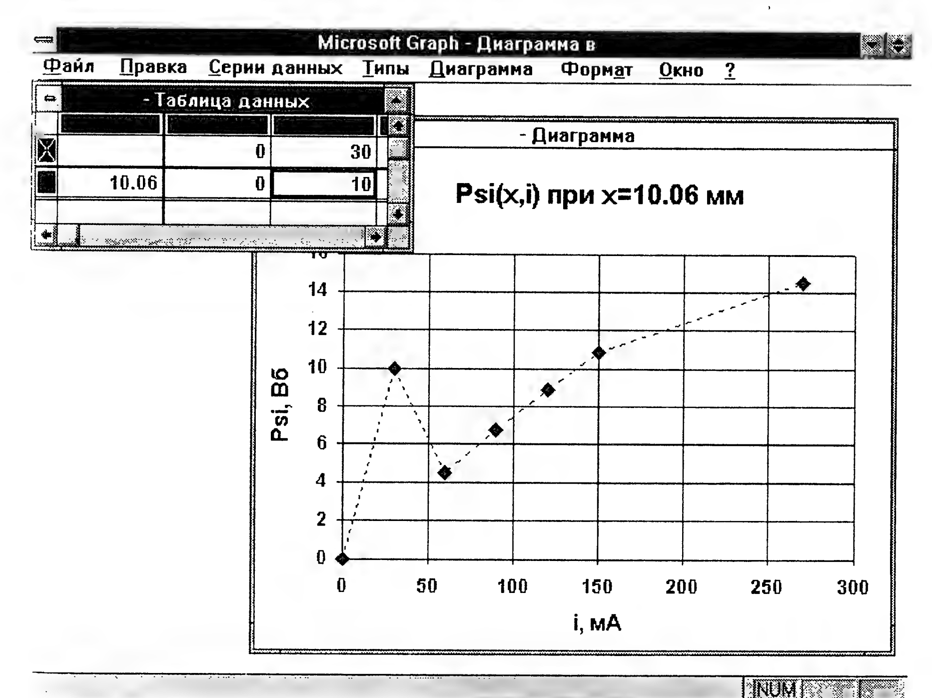


Рис. 6.11. Экран компьютера после замены в таблице данных приложения MSGraph цифры 4.48 на 10

числовых данных с клавиатуры крайне неудобен (нельзя исправлять в случае ошибки), а таблица утилиты MSGraph легко позволяет это сделать. Такая возможность продемонстрирована на рис. 6.11. Кривая на рис. 6.11 получена следующим образом. Основные исходные данные загружены с помощью кнопки **ab1.dat, par1.dat, or1.dat** формы **Главная** рис. 6.1. Щелчком на кнопке **Таблица** этой же формы получена **Таблица данных** рис. 6.4. Щелчком на кнопке **новый** этой формы получен график с кривой типа рис. 6.5, но в формате MSGraph. Двойной щелчок на графике вывел на экран монитора окно утилиты MSGraph с окном -**Таблица данных** и окном -**Диаграмма**, на котором повторилась кривая MSGraph. В последнем удалены неприсоединенный текст над легендой и Легенда, которые при построении одной кривой с помощью MSGraph выглядят неуместно, а также введен заголовок («Psi(x,i) при x=10.06 мм»). Щелчок на окне-**Таблица данных** сделал его активным. Прокрутка данных с помощью горизонтальной линейки прокрутки позволила показать ее левые столбцы. Правая граница таблицы с помощью мыши сдвинута налево для уменьшения ширины таблицы. Щелчок на ячейке с числом 2.21 выделил ячейку. Введенные с клавиатуры

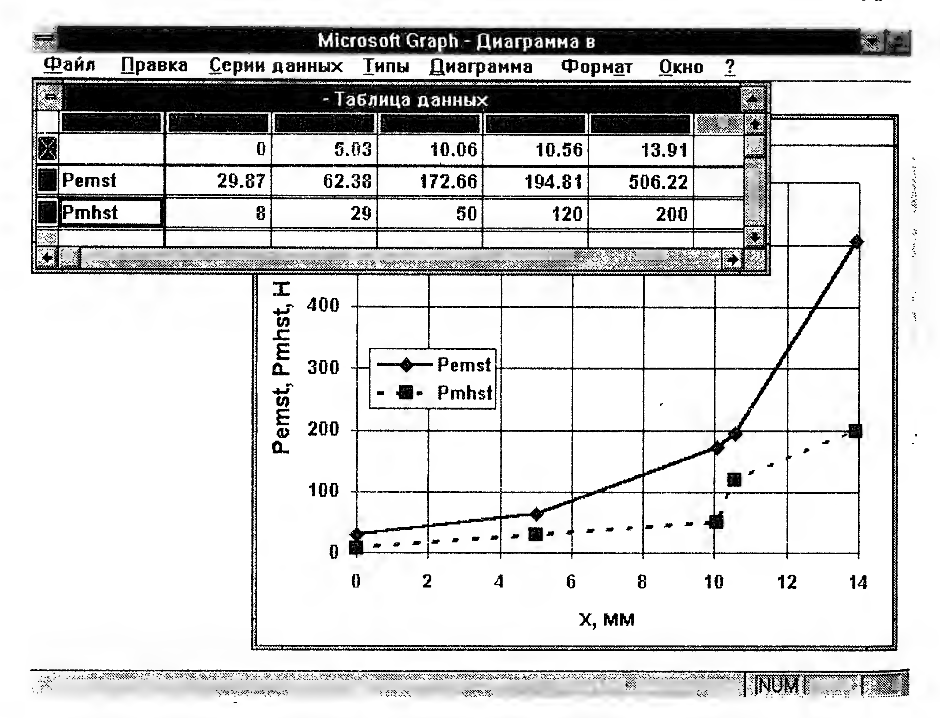


Рис. 6.12. Экран компьютера после загрузки файлов ab2.dat, par2.dat, or2.dat и редактирования таблицы и диаграммы MSGraph

цифры (10) автоматически заменили число 2.21. Щелчок вне таблицы ввел новые цифры в данные, что тут же отобразилось на кривой — возник максимум, соответствующий абсциссе i=30 mA и ординате Psi=10 Вб. При этом автоматически таблица прокрутилась до самого правого столбца и частично закрылась окном **Диаграмма** (как рис. 6.9). Щелчок на полосе заголовка таблицы расположил ее над окном диаграммы. Прокрутка столбцов таблицы с помощью горизонтальной линейки прокрутки опять вывела левые столбцы таблицы на экран. Нижняя граница таблицы поднята максимально вверх. Щелчок на клавише [PrtScr] взял изображение экрана в буфер межпрограммного обмена, из которого оно вставлено в документ Word 6 в виде рис. 6.11.

На графике рис. 6.12 показаны зависимости механической и тяговой сил электромагнита от перемещения. Он полностью идентичен рис. 11 Приложения 14, построенному по тем же числовым исходным данным. Рис. 6.12 демонстрирует возможности построения таких нескольких кривых на одном графике, которые имеют одну и ту же размерность по оси ординат, но не являются

Помощь1

Вы работаете с программой G&G построения таблицы и графиков по данным, которые можно ввести из файлов или с клавиатуры Создана на VB3 в февр. 1999г.

Автор - Буль О.Б., МГОУ.

Для ввода из файлов необходимо на текущем диске иметь хотя бы один их комплект, состоящий из трех файлов данных. Если это файлы с именами, назначенными программой и приведенными на форме 'Главная' справа от круглых кнопок внутри рамки с именем 'программой:' (например, 'ab1.dat, par1 dat, or1.dat'), то для ввода достаточно нажать ту из этих круглых кнопок, файлы для которой имеются на текущем диске В именах этих кнопок 'ab' с любой из цифр 1, 2, 3 означает файл данных, предназначенный для величин, откладываемых вдоль оси абсцисс графика и в верхнем (сером) ряду таблицы; 'par' с любой из цифр 1, 2, 3 - для величин, откладываемых в качестве параметра в легенде графика и в левом сером столбце таблицы, 'or' с цифрами 1, 2, 3 - для величин, откладываемых вдоль оси ординат. Число цифр файла ab1.dat должно быть равно числу столбцов структурированной матрицы данных файла or1 dat, а число цифр файла par1.dat - числу строк этой матрицы. Аналогичными свойствами должны обладать и другие комплекты файлов данных.

Комплект abt dat, part dat, ort dat предназначен для построения кривых, в которых в качестве абсциссы откладывается величина, использованная в основном варианте как параметр, а в качестве параметра - величина, которая использовалась как абсцисса. Таким образом, если за исходный вариант взять комплект 1, то файл abt.dat повторяет par1.dat, файл part.dat - ab1 dat, файл ort.dat - or1.dat. Перед щелчком на круглой кнопке abt, ort dat необходимо активизировать переключатель, расположенный в верхней части формы 'Главная' (рядом с ним должна появиться надпись 'матрица транспонирована'). После щелчка на кнопке abt,...ort.dat программа далее сама транспонирует файл ort.dat, превращая столбцы его матрицы в строки и наоборот

Для возврата к первой форме щелкните на кнопке 'Возврат'; для продолжения пояснений - на кнопке 'Следующая'

Печать | Следующая | Возврат

Рис. 6.13. Форма **Помощь1**

Помощь2

Комплект из трех файлов данных с произвольными именами можно загрузить с помощью прямоугольной кнопки 'пользователем'. После щелчка на этой кнопке появляется стандартное окно диалога 'Открыть' для указания устройства, директории и имени файла со значениями, которые на графиках будут отложены вдоль оси абсцисс После щелчка на кнопке 'OK' в этом диалоге или двойного щелчка на имени файла и загрузки первого файла окно диалога появляется снова. В нем следует ввести имя файла со значениями, которые в виде параметров войдут в легенду графиков (число данных в этом файле равно числу кривых). В третьем окне диалога вводится имя файла, в котором находятся значения, откладываемые на графиках вдоль оси ординат В таблицу данные 1-го файла вносятся в самую верхнюю строку, 2-го - в самый левый столбец, 3-го - в основную часть. Число данных в 1-ом файле должно быть равно числу столбцов матрицы данных 3-го, а число данных 2-го - числу строк матрицы 3-го

Если вы хотите поменять местами параметры и абсциссы, то сначала активизируйте переключатель в верхней части формы, затем в 1-ом окне диалога 'Открыть' введите файл со значениями, ранее использовавшимися в качестве параметров, во 2-ом - файл со значениями, которые вы хотите назначить в качестве параметров (ранее они откладывались вдоль оси абсцисс). Активизация переключателя в верхней части формы 'Главная' преобразует строки матрицы данных, которые загружаются в 3-ем диалоге 'Открыть' из того же файла, что и в основном варианте, в столбцы, а столбцы - в строки.

Чтобы вернуться к первой странице пояснений, щелкните на кнопке 'Предыдущая', перейти к следующей странице - на кнопке 'Следующая', к первой форме - на кнопке 'Возврат'.

Печать | Предыдущая | Следующая | Возврат

Рис. 6.14. Форма Помощь 2

Помощь 3

После щелчка на кнопке 'пользователем' (а также после щелчка на любой из круглых кнопок файлов данных с именами, назначенными программой) в оперативную память, кроме основных файлов данных, автоматически загружаются еще и эталонные вспомогательные исходные данные, которые постоянно находятся в коде программы. Они изображаются полужирным шрифтом в 9-и текстовых полях 3-х строк заголовка таблицы, которую можно увидеть на форме 'Таблица данных' (появляется на экране при щелчке на кнопке 'Таблица' формы 'Главная') Если вспомогательные исходные данные не соответствуют вашим величинам, то следует изменить их. Это можно сделать несколькими способами отредактировать те части заголовка таблицы, которые набраны полужирным шрифтом; щелкнув на кнопке 'Возврат' для возврата к форме 'Главная', а на последней - на кнопке 'с клавиатуры', ответить на запросы с экрана. Далее можно, щелкнув на кнопке 'Запись' внутри рамки 'Вспомогательные исходные данные:', записать последние в файл, имя которого можно набрать с клавиатуры в возникшем на экране диалоге 'Сохранить как' (или выбрать из имеющихся для перезаписи существующего файла). Рекомендуется сохранять вспомогательные исходные данные в файле под именем vid.dat с тем, чтобы при следующих запусках программы на исполнение вспомогательные исходные данные можно было загружать, щелкнув на кнопке 'vid.dat' внутри рамки 'из файла:'. Файл вспомогательных исходных данных с произвольным именем можно загрузить после щелчка на кнопке 'пользователя', при этом необходимо будет указать имя файла, путь и каталог в возникшем на экране диалоге 'Открыть'.

Чтобы вернуться к предыдущей странице пояснений, щелкните на кнопке 'Предыдущая', к следующей - на кнопке 'Следующая', к форме 'Главная' - на кнопке 'Возврат'.

Печать | Предыдущая | Следующая | Возврат

Рис. 6.15. Форма **Помощь 3**

Помощь 4



Для построения графика щелкните на нужной кнопке внутри рамки с именем 'Графики:'. BPSGraph - надпись на кнопке для построения графиков с помощью инструмента фирмы Bit Per Second, встроенного в Visual Basic. По умолчанию точки графика изображаются символами, которые можно не показывать, если перед кнопкой BPSGraph щелкнуть на активизированном флажке (крестик внутри квадратика), справа от которого имеется надпись 'символы точек кривых'. При этом крестик внутри квадратика пропадет.

Опции внутри рамки с надписью 'MSGraph' обеспечивают доступ к системе построения графиков, встроенной в некоторые программы корпорации Microsoft, например, в Word для Windows, и внедренной в программу G&G. Щелчок на опции 'новый' приведет к построению графика MSGraph по данным, введенным с помощью файлов исходных и вспомогательных данных. При щелчке на кнопке 'по умолчанию' строится диаграмма MSGraph с исходными данными по умолчанию - столбчатая, если файл default.gra этой программы не был заменен Любой из этих графиков можно изменить, если дважды щелкнуть на нем мышью. При этом происходит загрузка в оперативную память программы MSGraph, которая позволяет отредактировать график точно так же, как это делается при вызове MSGraph из Word. Можно изменить тип графика, шрифты, обозначения осей абсцисс, ординат, легенды и т.п. Если Вы хотите, чтобы эти изменения присутствовали во всех последующих графиках, то с помощью пункта Принять по умолчанию меню Файл можно заменить файл default.gra программы MSGraph. Именно с помощью MSGraph строятся графики, данные для которых можно ввести с клавиатуры, а не из файлов данных (ручная замена значений в ячейках таблицы, которая заполняется на форме 'Таблица данных', невозможна в отличие от замены данных в таблице MSGraph).

Чтобы вернуться к предыдущей странице пояснений, щелкните на кнопке 'Предыдущая' к следующей - на кнопке 'Следующая', к форме 'Главная' - на кнопке 'Возврат'.

Печать | Предыдущая | Следующая | Возврат

Рис. 6.16. Форма Помощь 4

Помощь5

После запуска программы на исполнение можно построить таблицы и графики BPSGraph и MSGraph для нескольких комплектов данных без выхода из программы, так как последняя позволяет менять главные и вспомогательные исходные данные неограниченное число раз При загрузке новых исходных данных они замещают старые, причем это не зависит от числа строк и столбцов таблицы. Необходимо только следить за состоянием переключателя в верхней части формы 'Главная': перед загрузкой основного варианта переключатель должен быть без крестика и с надписью 'матрица не транспонирована'; перед загрузкой транспонированных данных его следует активизировать щелчком мыши (при этом в квадратике переключателя появляется крестик, а справа от него - надпись 'матрица транспонирована').

Щелчок на кнопке 'Печать' любой формы выводит на принтер ее изображение

Чтобы вернуться к предыдущей странице пояснений, щелкните на кнопке 'Предыдущая', к форме 'Таблица данных' - на кнопке 'Возврат'.



Предыдущая | Возврат

Рис. 6.17. Форма **Помощь 5**

изображениями функциональной зависимости одной и той же величины от абсциссы при нескольких значениях параметра. Иными словами, найти числовое значение и размерность параметра, который бы характеризовал отличие одной кривой от другой, можно лишь условно. Для построения такого графика с помощью инструмента BPS следует несколько скорректировать код программы — в противном случае возникают проблемы со вводом вспомогательных исходных данных. Построить же график такого типа с помощью инструмента MSGraph достаточно просто, так как необходимую правку можно сделать в интерактивном режиме. В таблице на рис. 6.12 заменены цифры 1 и 2 самого левого столбца на обозначения Pemst и Pmhst. После щелчка на графике эти обозначения автоматически заменили цифры 1 и 2 легенды. Удален неприсоединенный текст («перемещение х в мм:») над легендой, сама она из правого нижнего угла сетки передвинута налево. Заменены обозначения и размерности осей координат. Рис. 6.12 приобрел окончательный вид после щелчка на заголовке -**Таблица данных**, увеличения ширины таблицы и ее прокрутки, при которой стало видно содержание всех ячеек. Использование в файле данных par2.dat вместо условных цифр 1 и 2 (Приложение 15) строковых значений Pemst и Pmhst не приведет к уменьшению объема редакторской правки внутри MSGraph. Эти строковые константы функцией Format процедуры GridDesign, которая преобразует числа Param(Nr) в текст формата « # 00.00», превратятся в таблице программы G&G и таблице утилиты MSGraph в нули. Поэтому в качестве файла par2.dat пригоден любой файл с двумя числами и даже двумя строковыми константами — все равно придется их корректировать в среде MSGraph.

Глава 7

ДИАГРАММЫ В EXCEL И WORD

Напоминаем, что в настоящей работе рассматривается в основном тип диаграммы (графика), который, по терминологии офисных программных продуктов корпорации Microsoft, называется Точечной. Так как по этой же терминологии имеется также тип диаграммы, называемый График и отличающийся от типа Точечная, во избежание путаницы в гл. 7 преимущественно будем использовать слова «точечная диаграмма» вместо слов «точечный график». О диаграмме типа График см. в конце п. 7.1.3 при описании рис. 7.12 и 7.13.

7.1. Диаграмма в Excel 97

Для построения диаграммы в Excel данные должны быть представлены в виде таблицы, основную часть которой занимает матрица из ординат, а верхнюю строку и левый столбец — векторы абсцисс и параметров. Иными словами, таблица должна быть такой же, как на рис. 6.2 или 6.6. Причем если абсциссы располагаются в верхнем горизонтальном ряду, то их число должно быть равно числу столбцов матрицы данных. При этом параметры должны располагаться в левом вертикальном столбце. Их число должно быть равно числу строк матрицы данных. Значения параметров используются в легенде диаграммы, по абсциссам Excel назначает цифры масштаба вдоль оси абсцисс, а по значениям цифр основной части таблицы-матрицы Excel рассчитывает цифры масштаба вдоль оси ординат.

Ниже описана последовательность действий пользователя для построения диаграммы в виде параметрических кривых по данным файлов ab3.dat, par3.dat, or3.dat (Приложение 15).

7.1.1. Ввод данных

1. Щелкнуть на кнопке **Открыть** (или щелкнуть на строке меню **Файл — Открыть...**). В появившемся окне диалога **Открытие документа** в поле **Тип файла** указать **Все файлы**. В этом случае имена файлов данных, созданных в DOS-программах, появятся в поле **Имя**, если правильно указана папка в поле **Папка**. Щелкнуть на нужном имени (в нашем случае or3) и на кнопке **Открыть** в этом диалоге. То же самое мы получим, если дважды щелкнем на строке с именем файла.

2. На экране возникает окно диалога **Мастер текстов (импорт) — шаг 1 из 3** (рис. 7.1). В рамке **Формат исходных данных** указать **с разделителями** (точка в кружке на рис. 7.1) и щелкнуть на кнопке **Далее >**.

3. На экране возникает окно диалога **Мастер текстов (импорт) — шаг 2 из 3** (рис. 7.2). В рамке **Символом-разделителем является**: указать (поставить галочку) слева от того разделителя, который используется в импортируемом файле данных. В нашем случае — это **пробел**. Так как в нашем файле данных каждая цифра слева и справа имеет по пробелу, то должен быть отмечен флажок **Считать последовательные разделители одним**. Так как в импортируемом файле данных слева от первых цифр каждой строки стоит по пробелу, Мастер текстов на шаге 2 создал один лишний (пустой) столбец — самый левый, но это не страшно — от него можно избавиться на шаге 3. Для перехода к последнему надо щелкнуть на кнопке **Далее >**.

Рис. 7.1. Шаг 1 Мастера текстов после изменения формата данных

4. В окне диалога (рис. 7.3), которое появляется на экране, левый пустой столбец оказывается выделенным (в инвертированном изображении). В рамке **Формат данных столбца** щелкнуть на кнопке **пропустить столбец**. Надпись **Общий** в строке заголовка этого столбца, которая появляется в этой строке над всеми столбцами по умолчанию, заменяется надписью **Пропустить**. Щелкнув на другом столбце, можно перенести выделение на него, но в этом нет необходимости, так как над столбцами цифр следует оставить заголовок **Общий**.

Рис. 7.2. Шаг 2 Мастера текстов после ввода необходимых установок

5. Щелчок на кнопке **Готово** показывает импортированную таблицу-матрицу в окне первых двух листов книги Excel. Она занимает ячейки A1 — M3.

6. Выделить всю таблицу с помощью мыши. Щелкнуть на кнопке **Вырезать** строки инструментов (с изображением ножниц). Таблицу окружает бегущий штриховой прямоугольник. Щелкнуть на ячейке B14. При этом толщина линии ее границы увеличивается. Щелкнуть на кнопке **Вставить** строки инструментов. Таблица-матрица переходит на ячейки B14 — N16. В таком положении она показана на рис. 7.4 в составе сводной таблицы данных рабочего листа книги Excel. Для наглядности отдельно она скопирована в ячейки C7 — O9. Перемещение таблицы-матрицы вниз на четырнадцатую строку резервирует строки 1 — 11 для других таблиц и их названий, строку 12 — для названия сводной таблицы, а 13 — для ввода значений абсцисс. Сдвиг таблицы-матрицы вправо на один столбец освобождает слева от нее место (столбец A) для ввода значений параметров.

7. Щелкнуть на кнопке **Открыть** строки инструментов и в появившемся диалоге **Открытие документа** указать имя файла со значениями, которые должны быть отложены вдоль оси абсцисс графика (ab3.dat). После двойного щелчка на строке с именем ab3.dat на экране вновь возникает окно диалога **Мастер текстов (импорт) — шаг 1 из 3**, которое от окна на рис. 7.1 отличается только именем предварительно просматриваемого файла и содержанием внутреннего окна просмотра.

8. После преобразований, аналогичных проведенным с файлом or3.dat и показанным на рис. 7.1 — 7.3, файл ab3.dat появляется в ячейках A1 — M1 новой книги Excel с именем ab3. Выделить его

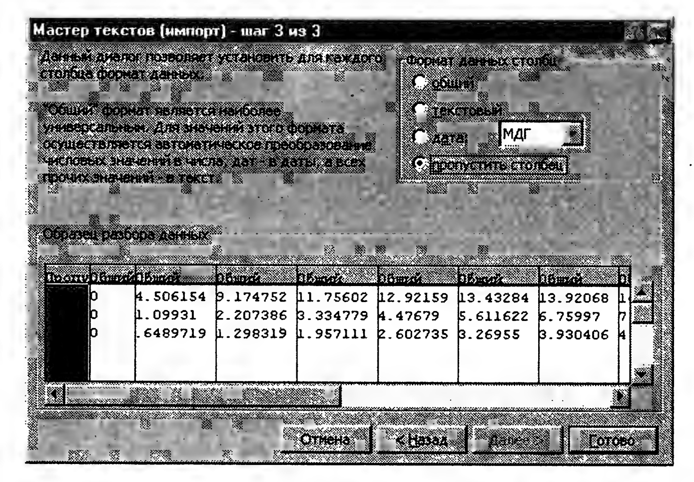


Рис. 7.3. Шаг 3 Мастера текстов после изменения формата данных левого столбца с **общий** на **пропустить столбец**

мышью и перенести в буфер обмена. Возвратиться к книге Excel под именем or3, например, через меню **Окно — имя файла**.

9. Щелкнуть на ячейке B13, которая находится над ячейкой B14, расположенной в левом верхнем углу таблицы-матрицы, уже вставленной в книгу Excel с именем or3. Щелкнуть на кнопке **Вставить** полосы инструментов. Над таблицей-матрицей возникает строка значений токов (цифры 0, 15, 30, 45, ...), каждое из которых занимает одну ячейку. Для наглядности отдельно эта однострочная таблица скопирована в ячейки C3 — O3.

10. Ввод данных файла par3.dat осуществляется аналогично описанным вводам or3.dat и ab3.dat. Однако он имеет особенность, связанную с необходимостью преобразования вектора-строки в вектор-столбец. Это преобразование делается в промежуточной книге под именем par3, в ячейки A1 — C1 которой Excel помещает три цифры файла par3.dat.

11. Выделить цифры файла par3 и вырезать в буфер, например, с помощью кнопки строки инструментов с изображением ножниц. Вокруг цифр файла возникает прямоугольник с бегущим контуром.

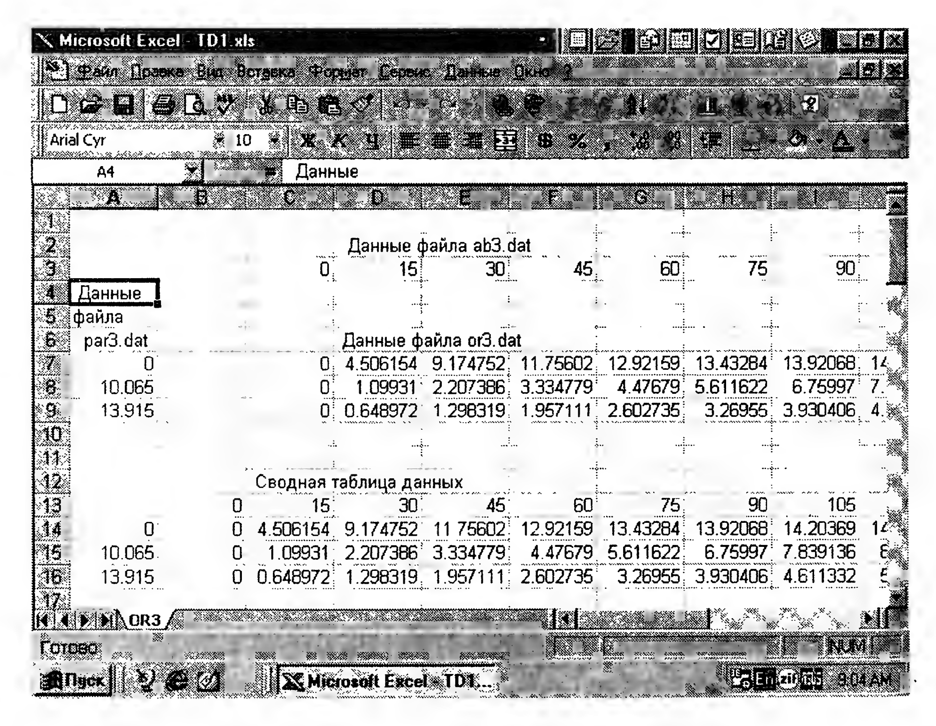


Рис. 7.4. Экран монитора после вставки файлов данных or3.dat, ab3.dat, par3.dat

12. Отметить любую ячейку, не занятую выделением, например, А2.

13. Щелкнуть на строке меню **Правка — Специальная вставка**. Возникает диалоговое окно **Специальная вставка**.

14. Щелкнуть на поле флажка слева от надписи **транспонировать** этого окна, потом на кнопке **ОК**. В ячейках А2 — А4 возникает таблица в одну колонку.

15. Выделить ее и щелкнуть на кнопке **Копировать** строки инструментов.

16. Вернуться в окно файла or3. Щелкнуть на ячейке А14. Эта ячейка должна находиться в одном ряду с первой строкой таблицы-матрицы or3, в которой находятся ординаты, слева от первой цифры этого ряда.

17. Щелкнуть на кнопке **Вставить** строки инструментов. Три цифры файла par3 займут ячейки А14 — А16. Для наглядности эта таблица в один столбец скопирована еще раз в ячейки А7 — А9.

На этом создание таблицы данных для построения диаграммы заканчивается. На рис. 7.4 сводная таблица данных показана в окончательно сформированном виде. Нетрудно заметить, что она полностью соответствует таблице на рис. 6.2.

По-видимому, кому-то описанный способ формирования таблицы (из файлов данных) покажется громоздким. Можно, конечно, вводить цифры этих файлов в соответствующие ячейки и вручную или комбинировать ручной ввод со вводом из файлов. Например, три цифры файла par3.dat легче и быстрее в ячейки А4 — А6 ввести с клавиатуры, чем заниматься обработкой и транспонированием данных исходного файла. Однако следует признать, что описанный способ ввода (через файлы и Мастер текста) при большом числе данных является самым надежным, так как страхует от возможных ошибок.

7.1.2. Построение диаграммы

1. Выделить всю таблицу.

2. Щелкнуть на кнопке **Мастер диаграмм**. Возникает окно диалога, показанное на рис. 7.5 (по умолчанию активна вкладка Стандартные).

3. В этой вкладке в поле **Тип** выделить **Точечная**, а в поле **Вид:** — ту, которая показана на рис. 7.5 (со значениями, соединенными сглаживающими линиями). Щелкнуть на кнопке **Далее >**.

4. На шаге 2 (рис. 7.6) во вкладке **Диапазон данных** необходимо выбрать один из способов представления данных: **Ряды в строках** или **Ряды в столбцах**. Надпись в окне диалога рис. 7.6 **Ряды в строках** следует понимать так: ординаты каждой кривой, построенной

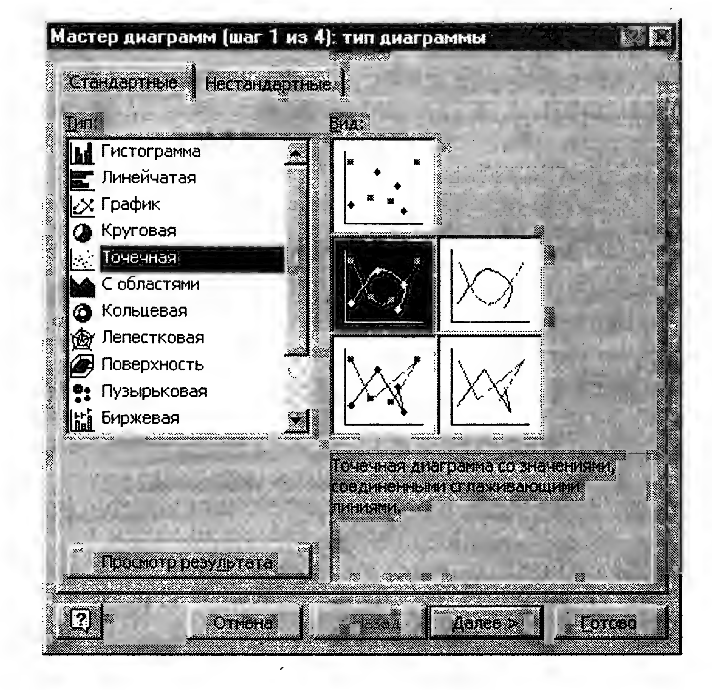


Рис. 7.5. Шаг 1 Мастера диаграмм

на графике, формируются значениями, стоящими в строке той части исходной таблицы, в которой находятся ординаты (у нас — потокосцепления). По оси абсцисс в этом случае откладываются значения самой верхней строки исходной таблицы, а в качестве параметра в легенде графика — значения самого левого столбца исходной таблицы. Образец диаграммы с таким способом представления данных как раз и показан на рис. 7.6.

5. Щелчок на кнопке **Далее >** открывает окно диалога рис. 7.7. на вкладке **Заголовки**. Вводим с клавиатуры необходимые символы в поля **Название диаграммы:**, **Ось X (категорий):**, **Ось Y (значений):**.

6. Во вкладке **Линии сетки** (рис. 7.8) щелчок на флажке слева от надписи **основные линии** внутри рамки **Ось X (категорий)** дополняет область построения диаграммы вертикальными линиями (в исходном образце на рис. 7.5 предусмотрены только горизонтальные линии, показанные на рис. 7.6, хотя в отечественной технической литературе область построения числовых графиков принято изображать в виде сетки из горизонтальных и вертикальных линий).

7. Щелчок на кнопке **Далее>** рис. 7.8 открывает окно шага 4 Мастера диаграмм, которое позволяет построить ее на отдельном

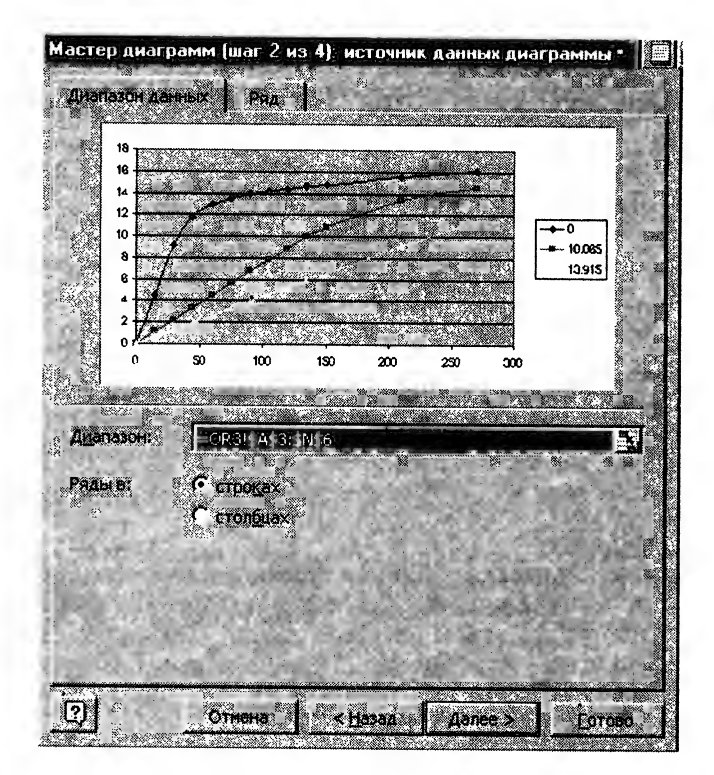


Рис. 7.6. Шаг 2 Мастера диаграмм

листе или поместить на имеющийся. Если после щелчка на кнопке **имеющемся** щелкнуть на кнопке **Готово**, то в центральной части экрана Excel возникает уже выделенная диаграмма, которую можно с помощью мыши перетащить на свободное место листа, изменить ее размеры и отформатировать.

Сначала ее внешний вид будет соответствовать образцу на рис. 7.8.

7.1.3. Редактирование диаграммы

Для изменения типа кривой и ее маркеров (в гл. 6 они назывались символами по английскому слову symbol, использованному в справке VB 3 по свойствам инструмента BPSGraph [23]) надо дважды щелкнуть на ней мышью. Открывается окно диалога, вкладка **Вид** которого (рис. 7.9) в рамке **Линия** позволяет изменить **тип линии**, ее **цвет** и **толщину**, а в рамке **Маркер** — изменить **тип маркера**, его **цвет**, **фон** и **размер**. На рис. 7.10 показана диаграмма, все три кривых которой сделаны толщиной, большей,

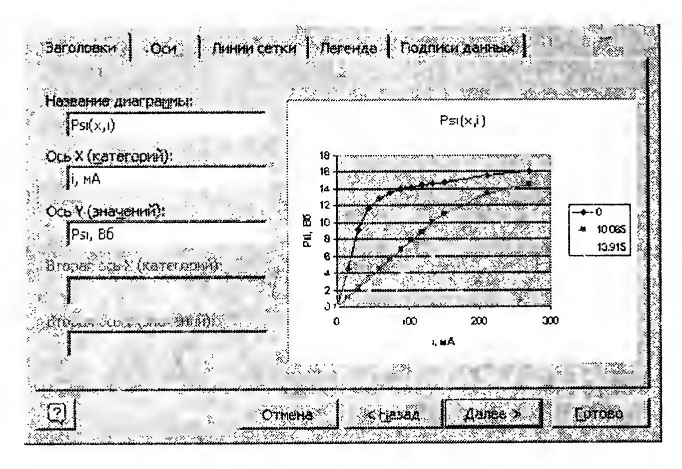


Рис. 7.7. Шаг 3 Мастера диаграмм. Вкладка **Заголовки** после ввода названий диаграммы и осей координат

чем по умолчанию (выбран образец линии, расположенный в строке выпадающего меню **Толщина** следующим по порядку ниже образца, соответствующего толщине по умолчанию). Цвет всех линий выбран черным, тип — сплошная, точечная и штрих-пунктирная. В рамке **Маркер** рис. 7.9 при построении диаграммы на рис. 7.10 была выделена кнопка **отсутствует**.

Для изменения типа и размеров шрифтов всех надписей надо дважды щелкнуть на свободной от надписей части области между

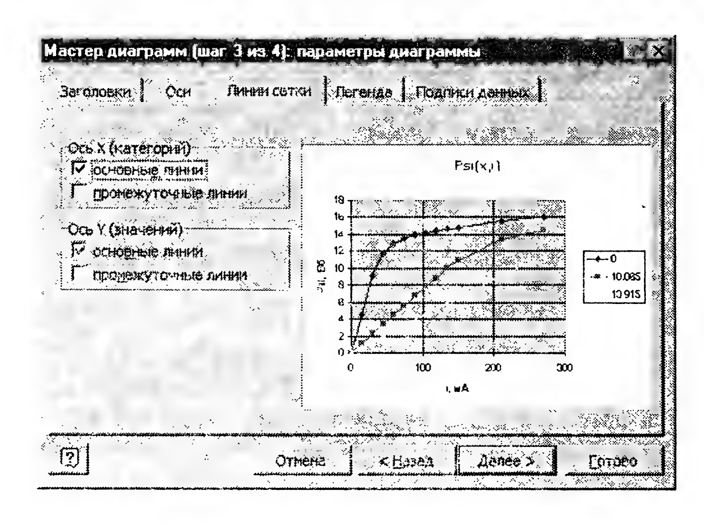


Рис. 7.8. Шаг 3 Мастера диаграмм. Вкладка **Линии сетки** после ввода основных линий сетки по оси X

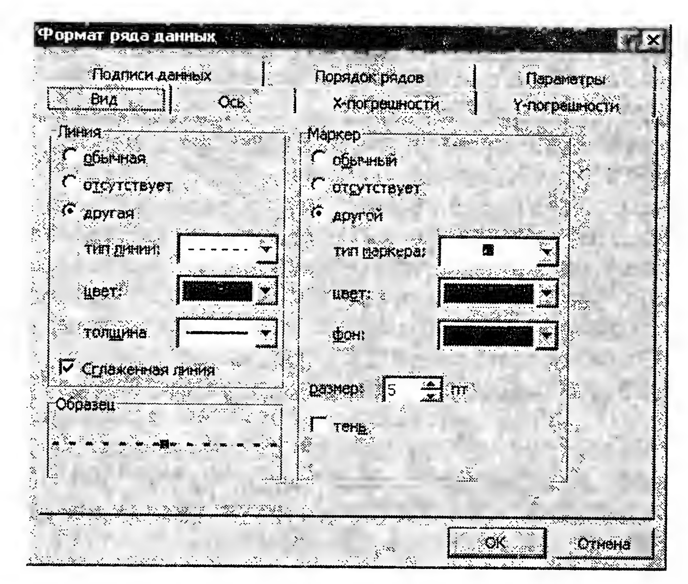


Рис. 7.9. Диалог **Формат ряда данных**

двумя прямоугольными рамками рис. 7.10, внутренней, которая ограничивает область построения, и наружней, ограничивающей всю диаграмму. Открывается окно диалога **Формат области диаграммы**, с помощью вкладки **Шрифт** которого можно одновременно изменить шрифт всех надписей диаграммы. Устанавливаем размер шрифта 14, оставляем название шрифта (Arial), принятое по умолчанию.

Для индивидуального редактирования шрифта какой-либо надписи диаграммы надо дважды щелкнуть на ней мышью. Если выделено, например, название диаграммы, то возникает окно диалога **Формат — Название диаграммы** со вкладками **Вид**, **Шрифт**, **Выравнивание**. Во вкладке **Шрифт** увеличиваем размер шрифта названия до 18 пунктов. Щелчок на названии оси аналогичным образом позволяет изменить шрифт названия этой выделенной оси (изменяем размеры шрифтов названий осей на 16 пунктов).

Для ввода текста, поясняющего содержание **Легенды** (такой текст называется свободным, или неприсоединенным), необходимо выделить область всей диаграммы и ввести этот текст («х в мм:») с клавиатуры. Одновременно со вводом с клавиатуры он появляется в строке формул окна Excel. Эта строка расположена над строкой заглавных латинских букв обозначения столбцов рабочего листа Excel правее знака равенства и начинается примерно с середины столбца С на рис. 7.4. Если нажать и отпустить клавишу

[Enter], то введенный текст, окруженный серой рамкой, по углам и в центрах сторон которой имеются восемь маленьких квадратиков, появляется в центральной части диаграммы. Шрифт этой надписи автоматически устанавливается с параметрами, введенными ранее во вкладке **Шрифт** окна **Формат области диаграммы** (размером 14 пунктов).

Ввод текста можно подтвердить также щелчком на галочке слева от знака равенства строки формул. Эта галочка при вводе с клавиатуры возникает между знаком равенства и кнопкой в виде треугольника, слева от которого на рис. 7.4 имеется надпись A4; при выделении диаграммы вместо A4 в этой части строки появляется надпись **Область диаграммы**. Перетаскиваем рамку с введенным текстом в правый верхний угол диаграммы (располагаем над легендой).

Область построения диаграммы по умолчанию имеет серый цвет, как на всех рисунках **Мастера диаграмм** (рис. 7.6 — 7.8). Двойной щелчок на этой области, но не на кривых или каких-либо других ее объектах выводит на экран диалог **Формат области построения**, во вкладке **Вид** которого внутри рамки **Заливка** изменяем **цвет** области построения на белый.

Уже упомянутая ранее диаграмма на рис. 7.10 построена после всех изменений, описанных выше в п. 7.1.3. Нетрудно видеть, что она почти полностью совпадает по значениям с диаграммой на рис. 6.3 и 6.8. Отличие (мало заметное на глаз) состоит в том, что опорные точки двух последних соединены прямыми линиями, а на рис. 7.10 — плавными.

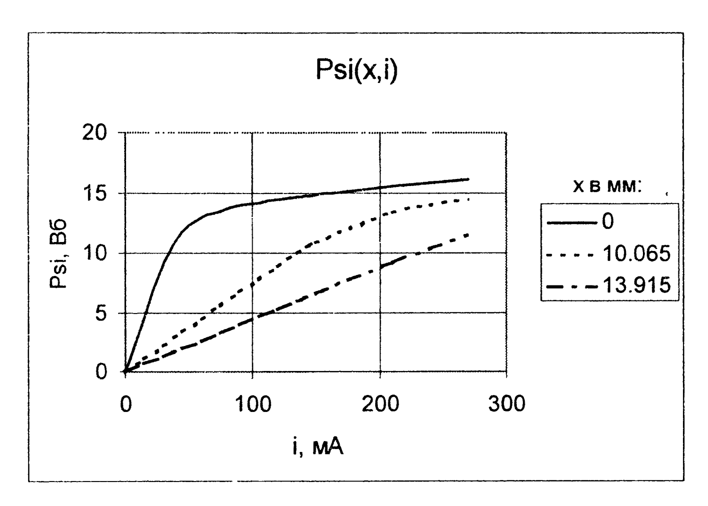


Рис. 7.10. Точечная диаграмма, построенная с использованием файлов or3.dat, ab3.dat, par3.dat в Excel 97 при данных в строках

На рис. 7.11 показана диаграмма, построенная по тем же исходным данным, что и на рис. 7.10, но во вкладке **Диапазон данных** (рис. 7.6) шага 2 **Мастера диаграмм** была активизирована кнопка **Ряды в столбцах**, а не в строках, как показано на рис. 7.6. Активизация кнопки **Ряды в столбцах** означает, что каждая кривая на этом графике (рис. 7.11) включает ординаты основной части таблицы, расположенные в столбцах. По оси абсцисс при этом откладываются перемещения, которые в сводной таблице (см. рис. 7.4) приведены в левом столбце, а в качестве параметра — значения, которые в сводной таблице сосредоточены в верхней строке. Получившиеся кривые отличаются от кривых рис. 6.7 и рис. 6.10 тем, что на рис. 6.7 и 6.10 опорные точки соединены прямыми, а на рис. 7.11 — плавными линиями. На рис. 7.11 всего 13 кривых — по числу столбцов исходной таблицы-матрицы ординат or3; на рис. 6.7 и 6.10 транспонированная исходная таблица-матрица ординат, показанная на рис. 6.6, содержит только 7 строк, поэтому и кривых всего семь. На рис. 7.11 отформатирована только кривая при i=0 мА (самая нижняя на графике и самая верхняя в Легенде), параметры других оставлены по умолчанию.

Цветной в файле и на экране рис. 7.11 напечатан черно-белым лазерным принтером. Этот принтер передает цвета разной

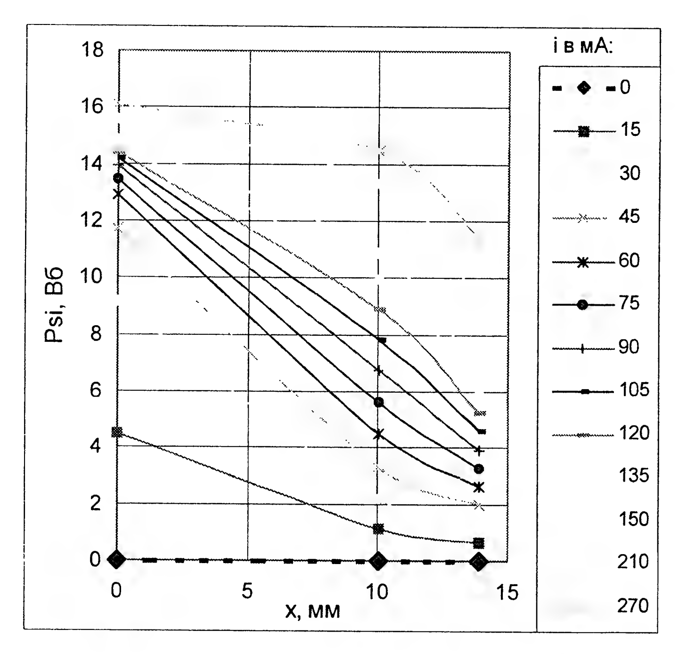


Рис. 7.11. Точечная диаграмма, построенная с использованием файлов or3.dat, ab3.dat, par3.dat в Excel 97 при данных в столбцах

интенсивностью черного цвета, поэтому на рис. 7.11 практически не видны некоторые кривые. Чтобы исключить такие потери, пользователь должен знать особенности передачи цвета своим принтером (если он черно-белый). Самый надежный способ изображения кривых черно-белым принтером — при форматировании присвоить им черный цвет и идентифицировать типом линий и символов, как это сделано на рис. 7.10.

Сравнение рис. 6.7, 6.10 и 7.11 показывает, что перенос графиков BPSGraph (рис. 6.3, 6.7) и MSGraph 3.0b (рис. 6.10, 6.12) в Word приводит к зазубренности кривых, особенно заметной на участках, расположенных под небольшим углом к вертикали и горизонтали. Перенос же диаграмм Excel в Word не изменяет их векторный характер.

На рис. 7.11 и всех последующих рисунках Excel (рис. 7.12 и 7.13) удалены засечки на осях координат. Для сравнения эти засечки оставлены на рис. 7.10. Для удаления засечек любой оси необходимо дважды щелкнуть на этой оси. Возникает окно диалога **Формат оси** с открытой вкладкой **Вид**. В рамке **Основные** щелкнуть на круглой кнопке, справа от которой стоит слово **нет** (по умолчанию активной является кнопка с надписью **наружу**). Щелкнуть на кнопке **ОК** окна диалога.

На рис. 7.12 показана диаграмма, построенная, как и рис. 7.11, по сводной таблице данных рис. 7.4, но на шаге 1 в списке **Тип**: (см.

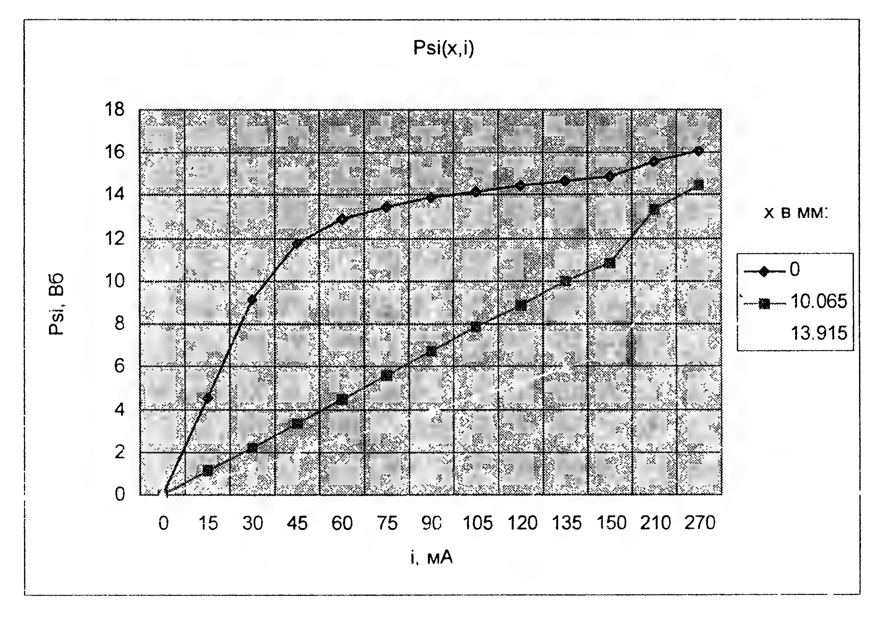


Рис. 7.12. Диаграмма типа График, построенная с использованием файлов or3.dat, ab3.dat, par3.dat в Excel 97 при данных в строках

рис. 7.5) был выбран **График** в отличие от **Точечная**, указанного при построении остальных уже рассмотренных диаграмм гл. 7. Для диаграммы типа График на шаге 1 **Мастера диаграмм** отсутствует возможность выбора подтипа со сглаженными линиями. Поэтому выбран подтип по умолчанию (со значениями, соединенными прямыми). Сглаживание любой кривой возможно позже на этапе формирования графика.

Как видно из рис. 7.12, на диаграмме типа График: 1) цифры значений абсцисс, взятые из файла ad3.dat Приложения 15 (они расположены в верхней строке сводной таблицы на рис. 7.4), откладываются не против вертикальных линий сетки, как у всех предыдущих диаграмм, а в середине между ними; 2) расстояние между цифрами оси абсцисс на рис. 7.12 на всех участках одинаковое, несмотря на то, что шаг между этими цифрами до 150 мА составляет 15 мА, а свыше 150 мА — 30 мА (см. файл данных ab3.dat Приложения 15, так как на рис. 7.4 столбцы при больших токах оказались за пределами окна). Последняя особенность диаграммы типа График приводит к искажениям хода кривых при токах, больших 150 мА (в нашем случае). Такое искажение можно отнести за счет смены масштаба по оси абсцисс, которая иногда может быть полезной (см., например, рис. 2.1 настоящей работы). Таким образом, это искажение в данном случае можно понять и принять, хотя оно выглядит несколько непривычно.

К недостаткам диаграммы типа График можно отнести наличие двух нулей — одного для оси ординат, другого для оси абсцисс. Еще одним недостатком этой диаграммы является изображение по оси абсцисс не цифр равномерного масштаба, как принято в отечественной научно-технической литературе, а цифр верхней строки таблицы данных. На рис. 7.12 эти цифры круглые, поэтому недостаток не проявляется. Однако если изобразить кривые на диаграмме типа График при данных в столбцах, то по оси абсцисс будут отложены, причем на равном расстоянии друг от друга, цифры 0, 10.065 и 13.915 (рис. 7.13), а не цифры 0, 5, 10 и 15, отложенные на точечной диаграмме рис. 7.11, построенной по тем же исходным данным. Если на рис. 7.12 разный шаг цифр вдоль оси абсцисс можно было интерпретировать как смену масштаба, то на рис. 7.13 цифры 0, 10.065 и 13.915, отложенные на равном расстоянии друг от друга, просто искажают вид кривых. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить кривые на рис. 7.13 и 7.11. Возражение вызывает также присвоение термина «график» одному из видов графика.

Описанное сравнение диаграмм типа Точечная и типа График, а также проведенное нами исследование возможности использования других типов диаграмм, которое здесь изложить не представляется возможным, показало, что для научно-технических целей

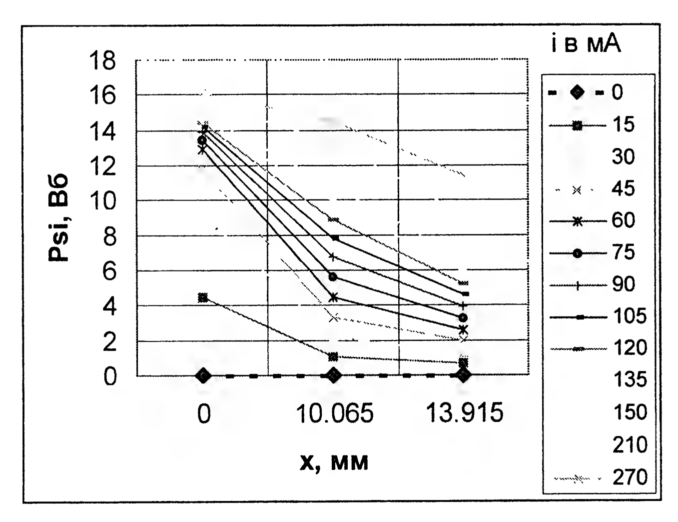


Рис. 7.13. Диаграмма типа График, построенная с использованием файлов or3.dat, ab3.dat, par3.dat в Excel 97 при данных в столбцах

самым подходящим типом диаграммы, по терминологии русскоязычных книг по программным продуктам корпорации Microsoft и по терминологии их русскоязычных версий, является Точечная.

7.2. Диаграммы в Word 97

Так как утилита MSGraph 97, с помощью которой в документах Word 97 строятся диаграммы, по своим возможностям уступает системе построения графиков, имеющейся в Excel, то диаграммы в Word имеет смысл строить только тогда, когда у пользователя нет Excel или если он мало знаком с последним, но хорошо ориентируется в Word.

Для построения диаграммы в Word, как и во всех ранее рассмотренных системах, сначала требуется сформировать таблицу. Исходные данные берем из файлов par2.dat, ab2.dat, or2.dat (Приложение 15), по которым строились кривые на рис. 6.12. Отдельные этапы формирования таблицы данных показаны в Приложении 18. Причем одинаковые порядковые номера этапа в п. 7.2.1 настоящей работы и в Приложении 18, обозначенные одной и той же цифрой с круглой скобкой, соответствуют друг другу.

Пользователь еще до формирования таблицы, даже до момента написания строк кода DOS-программы, выводящей данные в файлы, должен хорошо представлять себе, какие места в таблице должны занять данные из этих трех файлов. В примере, который

рассмотрен ниже, будем создавать таблицу, изображенную на рис. 6.12. Только вместо Pemst и Pmhst в ней сначала будут стоять цифры 1 и 2 файла par2.dat.

7.2.1. Формирование таблицы данных

1) Открываем в Word файл par2.dat. Для этого в окне **Открытие документа** необходимо раскрыть список **Тип файлов**: и выделить в нем **Все файлы**. Подходит также пункт **Восстановление текста из файла....** Двойной щелчок на par2.dat загружает в первую строку цифры 1 и 2, разделенные двумя пробелами. Имеются также пробелы перед цифрой 1 и после цифры 2, невидимые в листинге файла par2.dat, показанном в п. 1) Приложения 18. Сразу же, чтобы случайно не испортить файл данных par2.dat, записываем файл, в котором будем формировать таблицу и строить диаграмму, под новым именем pril18 в формате **Документ Word**.

2) Выделяем цифры 1 и 2 файла так, чтобы пробел за последней цифрой не входил в выделение, а перед первой цифрой входил (он нам понадобится для создания правильной структуры таблицы данных). Щелкнув на строке меню **Таблица — Преобразовать в таблицу...**, получаем на экране окно диалога **Преобразовать в таблицу** (рис. 7.14), которое предлагает выбрать разделитель, число столбцов и число строк. Среди имеющихся в рамке **Разделитель** нам подходит только под именем **другой**:, так как использованный в файле par2.dat пробел в качестве разделителя в этом окне отдельно не представлен. Сначала Word предлагает в поле **Число столбцов:** цифру 4, хотя в нашем файле всего две цифры. В поле **Число строк:** стоит цифра 1, но она для редактирования недоступна. Так как нам нужен один столбец вместо строки, в этом окне в поле **Число столбцов:** устанавливаем 1, как показано на рис. 7.14. В поле **Число строк:** автоматически устанавливается 4. В поле **Ширина столбца** вместо **Авто** укажем, например, 1 см (если оставить Авто, то ширина столбца будет равна ширине страницы). После щелчка на **ОК** этого окна получаем таблицу в один столбец и четыре строки.

3) В полученной таблице между второй и четвертой строками имеется пустая ячейка, в которую Word преобразовал второй пробел между цифрами (первый он посчитал разделителем). Эта пустая ячейка создана Word из-за того, что в окне диалога **Преобразовать в таблицу** не предусмотрен флажок **Считать последовательные разделители одним**, который имеется на шаге 2 Мастера текстов Excel 97 (см. рис. 7.2). Для удаления пустой строки надо сначала щелкнуть слева от нее (для выделения), а потом щелкнуть на строке меню **Таблица — Удалить строки**.

4) Открываем файл ab2.dat. Выделим его без выделения пробелов в начале и в конце файла. Через меню **Таблица — Преобразовать**

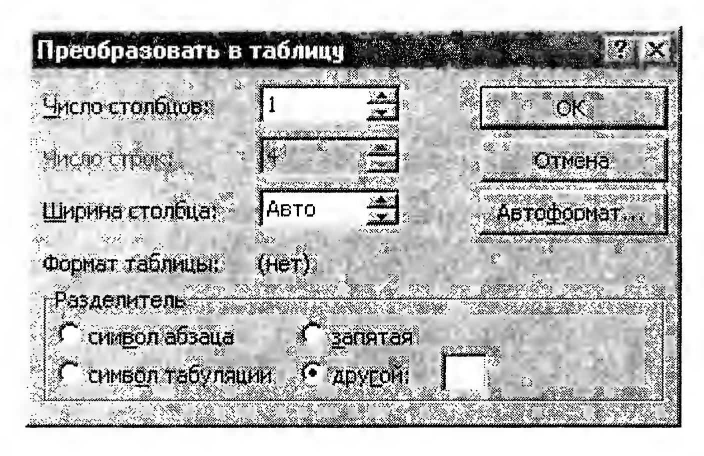


Рис. 7.14. Окно **Преобразовать в таблицу** после необходимых изменений

в таблицу... получаем окно диалога, в котором оставляем указанное число столбцов (9) при числе строк 1. Разделитель — **другой:**, в поле **ширина столбца:** оставляем **Авто**.

5) После щелчка на **ОК** получаем таблицу, в которой между пятью ячейками с цифрами находятся 4 пустые ячейки, созданные по той же причине, что и пустая ячейка между ячейками с цифрами 1 и 2 в таблице, созданной в конце п. 2) и описанной в п. 1).

6) Последовательно выделяем пустые ячейки и удаляем их через меню **Таблица — Удалить столбцы**. Для выделения столбца надо подвести указатель мыши, который имеет форму прописной латинской буквы I, к верхней границе столбца так, чтобы указатель превратился в черную направленную сверху вниз вертикальную стрелку, указывающую острием на столбец, и щелкнуть левой клавишей мыши. После удаления пустых столбцов берем получившуюся таблицу в буфер и возвращаемся в файл pril18.doc.

7) Щелкаем справа от верхней пустой ячейки таблицы, сформированной в пп. 1) — 3). Щелкаем на кнопке **Вставить** строки инструментов. Горизонтальная таблица присоединяется к вертикальной на уровне верхней ячейки последней.

8) Открываем файл or2.dat и тоже преобразуем его в таблицу. Освобождаться от выделения лишних пробелов в начале и в конце строк не следует, так как это может привести к сдвигу одной строки файла данных относительно другой.

9) После преобразования получаем таблицу с двумя строками и одиннадцатью столбцами, из которых шесть пустые. Так как ширина страницы недостаточна для изображения в одну строку восьми символов, из которых состоят числа первой строки табли-

цы, внутри каждой ячейки четыре символа автоматически переносятся на следующую строку этой же ячейки.

10) Удаляем пустые столбцы. После этого выделяем всю таблицу, щелкаем на строке меню **Таблица — Высота и ширина ячейки...** и в появившемся окне диалога **Высота и ширина ячейки** во вкладке **Столбец** щелкаем на кнопке **Автоподбор**. Ширина ячеек при этом увеличивается и символы цифр внутри каждой ячейки верхней строки выстраиваются в одну строку (не переносятся на следующую). Берем получившуюся таблицу в буфер и вновь возвращаемся в файл pril18, в котором формируем таблицу данных для построения графика.

11) Щелкаем мышью во внутреннем углу таблицы, сформированной в п. 7) из файла par2.dat, преобразованного в таблицу-столбец, и файла ab2.dat, преобразованного в таблицу-строку. Щелкаем на кнопке **Вставить**. Внутренний угол заполняется таблицей-матрицей, созданной по данным файла or2.dat. В общем случае вертикальные границы ячеек верхней строки не совпадают с вертикальными границами вновь вставленной таблицы-матрицы.

12) Чтобы это поправить, выделяем всю таблицу, щелкаем по строке меню **Таблица — Высота и ширина ячеек...** и в окне диалога **Высота и ширина ячеек** во вкладке **Столбец** щелкаем на кнопке **Автоподбор**. Ширина всех ячеек автоматически выравнивается.

7.2.2. Построение и редактирование диаграмм

Выделяем всю таблицу и берем ее в буфер обмена, щелкнув на строке **Копировать** строки инструментов. Щелкаем на строке меню **Вставка — Объект...** и в окне диалога **Вставка объекта** (во вкладке **Создание**) выделяем строку **Диаграмма Microsoft Graph 97** (рис. 7.15). Щелкаем на кнопке **ОК**. В окне **Microsoft Word — pril18.doc** возникает рисунок диаграммы по умолчанию (тип — Гистограмма) и окно с названием **pril18.doc — Таблица данных** (рис. 7.16). Первая часть этого названия — имя файла, в котором сформирована таблица данных. Обратим внимание на то, что внедрение объекта не привело к выходу из среды Word (над диаграммой видна таблица документа pril18.doc), а только несколько изменило строки его меню и инструментов.

Если перед обращением к меню **Вставка — Объект...** после копирования таблицы в буфер обмена снять с нее выделение, щелкнув где-нибудь на свободном месте документа, то на экране возникает стандартная столбчатая диаграмма (Гистограмма) по умолчанию с данными тоже по умолчанию (рис. 7.16). Если перед обращением к меню **Вставка — Объект** таблицу с нашими исходными данными оставить выделенной, то данные по умолчанию

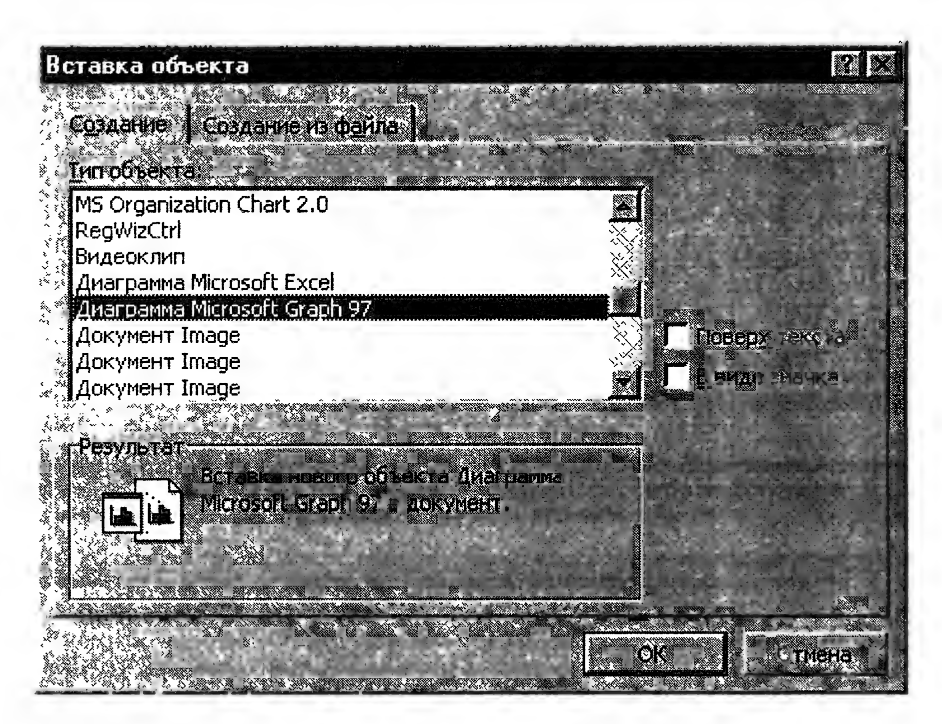
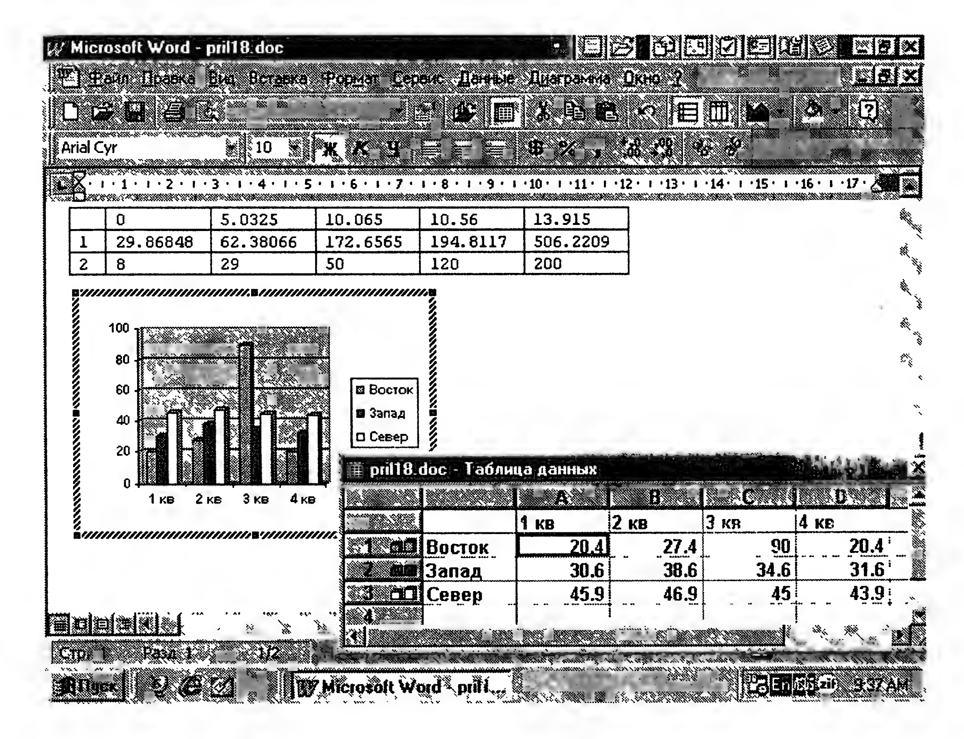


Рис. 7.15. Окно **Вставка объекта** с выделенной строкой **Диаграмма Microsoft Graph 97**

автоматически заменятся нашими данными, взятыми в буфер (рис. 7.17). Однако при этом MSGraph ошибочно воспринимает как ординаты все три строки таблицы, а не две нижних, как нам хотелось бы. На рис. 7.17 видны номера этих строк (1, 2 и 3) в самом левом столбце таблицы MSGraph с условными обозначениями столбцов каждой строки, имеющих на экране разную окраску. Цвет столбцов какой-либо строки в таблице MSGraph совпадает с цветом столбцов, представляющих эту серию данных на диаграмме. На черно-белом рисунке их можно отличить по степени черноты.

Дальнейшее уточнение диаграммы позволяет воспользоваться любым из двух вышеописанных и показанных на рис. 7.16 и 7.17 путей ее получения. Наши данные были специально подготовлены для диаграммы типа Точечная. Для перехода к ней необходимо щелкнуть на строке меню **Диаграмма — Тип диаграммы...** . На экране возникает окно диалога **Тип диаграммы**, отличающееся от рис. 7.5 только заголовком и нижней строкой с кнопками управления. В поле **Тип:** надо выделить **Точечная**, а в поле **Вид:** — подтип, расположенный в левом нижнем углу (Точечная диаграмма, на которой значения соединены отрезками прямых линий). Подтип



	0	5.0325	10.065	10.56	13.915
1	29.86848	62.38066	172.6565	194.8117	506.2209
2	8	29	50	120	200

		A	B	C	D
		1 кв	2 кв	3 кв	4 кв
1	Восток	20.4	27.4	90	20.4
2	Запад	30.6	38.6	34.6	31.6
3	Север	45.9	46.9	45	43.9
4					

Рис. 7.16. Диаграмма и таблица MSGraph, построенные без предварительного выделения таблицы данных Word-документа перед обращением к меню **Вставка — Объект...** и выбором Диаграмма Microsoft Graph 97 в списке типов объектов

рис. 7.5 для рассматриваемых кривых не подходит, потому что скруглять прямые, соединяющие узловые точки механической характеристики, нельзя. Скруглить же тяговую характеристику мы сможем позднее при редактировании графика. После щелчка на кнопке **ОК** на диаграмме возникают три кривых, а в левом верхнем углу белого поля таблицы MSGraph — слово **Значения**. Остальная часть верхней строки этой таблицы осталась незаполненной. Утилита MSGraph 97 опять не смогла правильно интерпретировать полученные данные.

Чтобы диаграмму построить без ошибок, надо правильно сформировать таблицу данных MSGraph, для чего следует ранее внесенные данные удалить. Последнее можно сделать, если предварительно выделить все данные таблицы. Для этого проще всего щелкнуть левой клавишей мыши, когда ее указатель (на поле таблицы он превращается в жирный белый крест с черной тенью) находится в пределах левой верхней серой ячейки окна pril18.doc — Таблица данных. Цвет всех белых ячеек таблицы (кроме той, которая была выделена до выделения всей таблицы) инвертируется

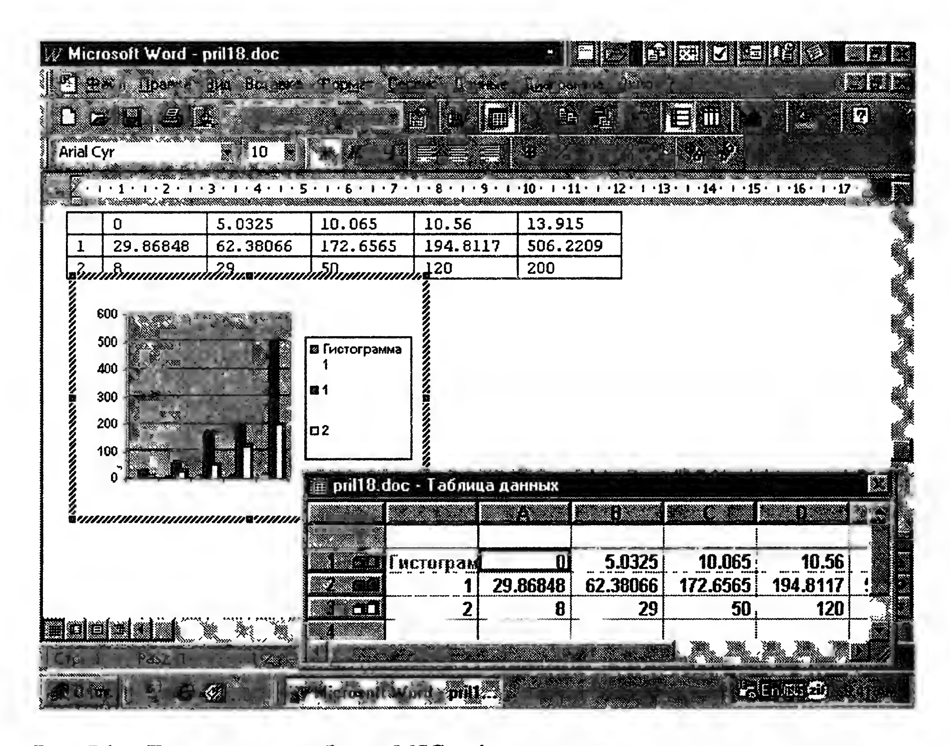


Рис. 7.17. Диаграмма и таблица MSGraph, построенные после предварительного выделения таблицы данных Word-документа перед обращением к меню Вставка — Объект... и выбором Диаграмма Microsoft Graph 97 в списке типов объектов

(фон становится черным, а цифры белыми). Нажмем и отпустим клавишу [Del] — диаграмма и цифры из таблицы пропадут. Щелкнем на кнопке **Вставить** строки инструментов (обратите внимание, что эта кнопка поменяла свое место — в строке инструментов, преобразованной MSGraph, по умолчанию она находится несколько правее, чем в Word 97). MSGraph в специальном окне с восклицательным знаком сообщает нам, что данные в буфере не совпадают по размеру и форме с выделенной областью, и просит разрешения вставить данные независимо от этого. Надо щелкнуть на кнопке **ОК**. Тогда исходные данные нашей таблицы, отправленные в буфер еще в самом начале п. 7.2.2, займут верхние левые ячейки белого поля таблицы MSGraph и тут же в соответствии с ними будет построена правильная точечная диаграмма (рис. 7.18).

К тем же результатам приводят и другие порядки действий. Можно, например, после построения столбчатой диаграммы по умолчанию удалить в таблице MSGraph нижний (3-й) ряд данных (для этого надо щелкнуть на ячейке с цифрой 3 в левом столбце, что

приведет к инвертированию ячеек с цифрами строки 3, и нажать клавишу [Del]). Затем щелкнуть на левой верхней белой ячейке (на рис. 7.18 в ней имеется надпись Значения) и, наконец, на кнопке **Вставить** строки инструментов. Если до этого момента мы не поменяли тип диаграммы, то по нашим исходным данным будет построена гистограмма, показанная на рис. 7.19. Как видим, обозначения по оси абсцисс у этой диаграммы страдают теми же недостатками, что и у диаграмм типа График (см. рис. 7.12 и 7.13), однако диаграмма на рис. 7.19 все же изображает две серии данных, а не три, как на рис. 7.17. Так как гистограмма нас не устраивает, мы тут же через меню **Диаграмма — Типы диаграммы...** и диалог **Типы диаграмм** можем поменять ее на точечную — получим диаграмму, показанную на рис. 7.18.

Для того чтобы покинуть среду утилиты MSGraph 97, достаточно щелкнуть где-либо на свободном месте ее окна, показанного на рис. 7.16, 7.17 и 7.18. При этом пропадает окно таблицы MSGraph, строки меню и инструментов приобретают привычный для Word вид, а диаграмма (без рамки из штрихов и черных квадратиков по углам и в центрах сторон этой рамки) остается на своем месте. С этого момента она является частью докумен-

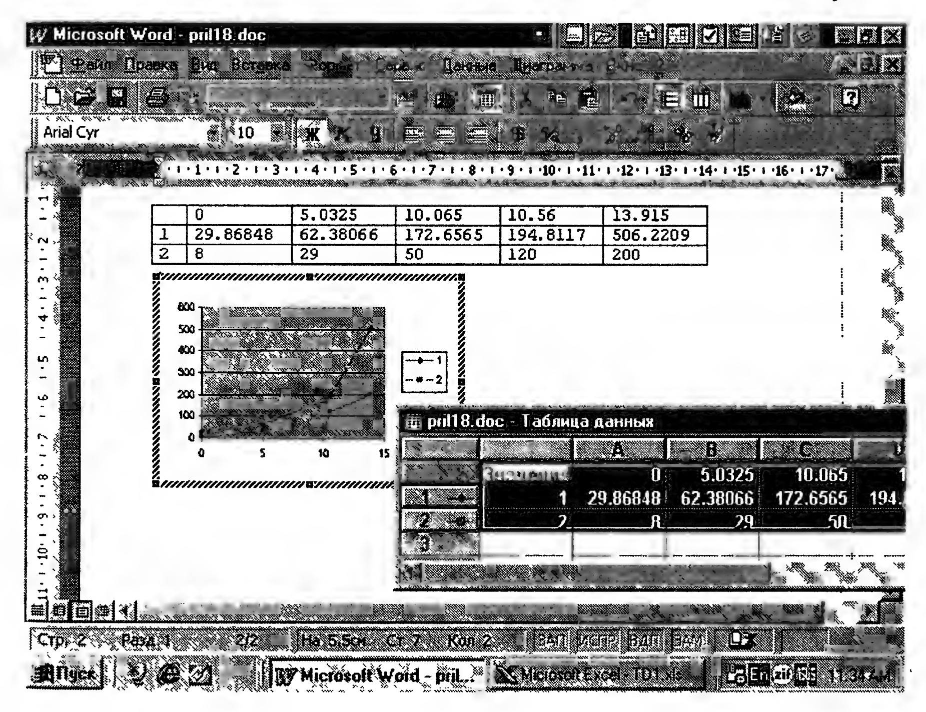


Рис. 7.18. Точечная диаграмма, построенная по данным файлов par2.dat, ab2.dat и or2.dat в окне Word 97 — MSGraph 97

та Word (внедрена в него). После однократного щелчка на диаграмме (при этом она окружается прямоугольником из тонких сплошных линий с маленькими квадрактиками по углам и в центрах сторон) можно масштабировать ее, передвигать на другое место документа, брать в буфер и переносить в другие программы и документы.

Если необходимо отредактировать диаграмму, то двойной щелчок на ее области вновь возвращает таблицу MSGraph и меню Word, преобразованное MSGraph, а область диаграммы, как на рис. 7.16, 7.17 и 7.18, выделяется прямоугольником с границами из широкой полосы в виде косой штриховки. В углах и центрах сторон этого прямоугольника расположены черные маленькие квадраты. Диаграмму теперь можно редактировать примерно так же, как это было описано при объяснении рис. 6.8 — 6.12 с диаграммами MSGraph 3.0b, и так, как это было описано при редактировании диаграмм Excel 97 в п. 7.1. С нашими исходными данными легко повторить диаграмму рис. 6.12. Однако MSGraph 97 имеет больше возможностей, чем MSGraph 3.0b. Так, двойной щелчок на кривой 1 (тяговая характеристика) выводит на экран окно диалога **Формат ряда данных**, отличающееся от рис. 7.9 Excel только отсутствием вкладки **Порядок рядов**. Во вкладке **Вид** устанавливаем флажок в прямоугольном поле слева от надписи **Сглаженная линия**. Увеличиваем также толщину линии. Двойной щелчок на кривой 2 (механическая характеристика) позволяет увеличить ее толщину и изменить цвет на черный, а тип линии на штриховую, принятую для этой характеристики на рис. 5.9, 5.10, 6.12 и рис. 11 Приложения 14. Замена цвета кривой 2 вызвана тем, что в MSGraph цвет линии при печати на черно-белом лазерном принтере, на котором был подготовлен оригинал-макет части III книги, отражается интенсивностью черного цвета. При печати без изменения цвета, принятого для нее по умолчанию, кривая 2 получалась слабо различимой.

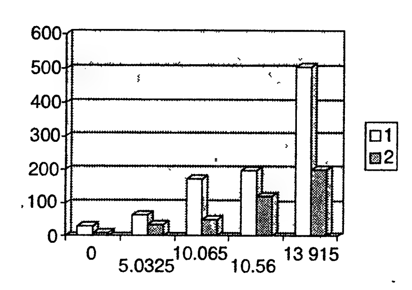


Рис. 7.19. Гистограмма, построенная по данным файлов par2.dat, ab2.dat и or2.dat

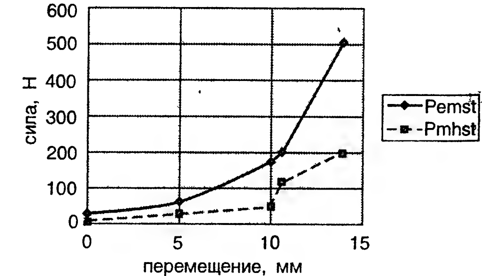


Рис. 7.20. Точечная диаграмма после редактирования в MSGraph 97

В окне диалога **Параметры диаграммы**, вызванном через меню **Диаграмма — Параметры диаграммы...**, вводим основные линии сетки по оси X, а во вкладке **Заголовки — Название диаграммы** и названия ее осей. В таблице MSGraph заменяем цифры 1 и 2 левого столбца на Pemst и Pmhst. Диаграмма, отредактированная описанным образом, изображена на рис. 7.20. Сравнение ее с рис. 35 Приложения 14, на котором эта же тяговая характеристика (штрих-пунктирная) построена в MCAD после сплайн-интерполяции, показывает, что возможности MSGraph 97 по скруглению ломаной линии весьма посредственные. В то же время следует отметить, что качество кривых, полученных с помощью MSGraph 97, выше, чем кривых MSGraph 3.0b (на рис. 7.20 отсутствует зазубренность, которая имеет место на рис. 6.12).

7.2.3. Особенности формирования таблицы для построения точечной диаграммы по данным, расположенным в столбцах

Ниже описаны проиллюстрированные в Приложении 19 этапы формирования таблицы данных для файла bh10895, с которым мы уже познакомились в начале Приложения 1.

1) Загрузить в Word 97 файл bh10895. Он состоит из десяти строк, в каждой из которых первая цифра — магнитная индукция B в Тл — и вторая — напряженность магнитного поля H в А/м — разделены запятой. Этот файл не содержит координат начальной точки кривой B(H) — их предстоит ввести с клавиатуры.

2) Преобразовать файл в таблицу из двух столбцов.

3) Добавить две строки сверху. Первая дополнительная строка нужна для создания правильной структуры таблицы данных, вторая — для ввода координат начальной точки кривой B(H). Во вторую дополнительную строку вставить с клавиатуры 0 (ноль) в каждую ячейку (начальная точка любой кривой B(H) совпадает с началом координат).

4) Так как необходимо построить кривую B(H), а файл содержит магнитные индукции в левом столбце, а напряженности магнитного поля — в правом, поменять столбцы местами (данные левого столбца MSGraph откладываем по оси абсцисс диаграммы, правого — по оси ординат). Для этого надо выделить правый столбец и с помощью кнопки **Вырезать** строки инструментов отправить его в буфер обмена. Потом надо выделить оставшийся левый столбец и щелкнуть на кнопке **Вставить** строки инструментов — столбец напряженностей магнитного поля займет свое место слева от столбца магнитных индукций. В нашем случае потребовалось еще через меню **Таблица — Высота и ширина ячейки...** — вкладка **Столбец** — кнопка **Автоподбор** увеличить ширину столбца напряженностей магнитного поля с тем, чтобы длинные цифры внутри

ячеек не занимали по две строки. В пустую правую верхнюю ячейку таблицы можно вставить обозначение, которое будет фигурировать в легенде графика, но так как при одной кривой необходимость в легенде отпадает, лучше оставить верхнюю строку незаполненной. В любом случае она в таблице должна присутствовать.

При редактировании диаграммы не забыть щелкнуть на строке **Ряды образуют столбцы** меню **Диаграмма** (или щелкнуть на кнопке **По столбцам**). По умолчанию активным является режим **Ряды образуют строки**. Кнопка **По столбцам** — четвертая справа в строке инструментов на рис. 7.16 — 7.18 (третьей сверху). Она расположена справа от активной на этих рисунках кнопки **По строкам**.

Точечные диаграммы, построенные по данным файла bh10895 и отредактированные в MSGraph, приведены на рис. 1 и 2 Приложения 19. При построении диаграммы на рис. 1 были выделены все 12 строк созданной на этапе 4 таблицы данных. Полученная при этом диаграмма соответствует рис. 1 Приложения 1. При построении диаграммы на рис. 2 Приложения 19 перед вставкой объекта MSGraph 97 были выделены только семь верхних строк таблицы. Сравнение этого рисунка с рис. 3 Приложения 1 показывает их полную идентичность.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АППРОКСИМАЦИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛА (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ B(H).mcd)

*Для **B< =1.6** Тл проводится кубическая сплайн-интерполяция, для **B>1.6** Тл — линейная. При **B< =1.6** Тл стыковка двух соседних кубических полиномов осуществляется с помощью функции **lspline**.*

....

Координаты точек кривой намагничивания извлекаются рабочим документом из файла данных **bh10895.dat**. Если последний находится не в текущем каталоге, то еще до загрузки рабочего документа с помощью подменю Associate Filename из меню File необходимо установить связь между ним и файловой переменной **bh10895.dat**, которая является аргументом функции **READPRN**. Файл данных **bh10895.dat** имеет 10 рядов, в каждом из которых две цифры: первая — магнитная индукция в Тл, вторая — напряженность магнитного поля в А/м.

Извлечение данных с использованием функции **READPRN** и присваивание их элементам матрицы **BH**:

BH: =READPRN bh10895.dat. (1)

Вводим матрицу из двух нулевых элементов (координаты начальной точки любой кривой намагничивания: при магнитной индукции 0 Тл напряженность магнитного поля равна 0 А/м):

BH0: =(0 0). (2)

С помощью функции stack добавляем над матрицей **BH** матрицу (вектор-строку) **BH0** с двумя нулевыми элементами, которых нет в нашем файле данных. Получаем новую матрицу, за которой сохраняем старое имя:

BH: =stack(BH0,BH). (3)

Выделяем левый столбец суммарной матрицы **BH** в отдельный столбец чисел (вектор) **vB**, а правый столбец — в отдельный вектор **vH**:

$vB := BH^{<0>}$; $vH := BH^{<1>}$.

С помощью функции rows определяем порядковый номер последнего ряда матрицы ВН (ряды матриц MathCAD по умолчанию нумерует, начиная с нулевого):

q:=rows(BH)−1.

Получившееся числовое значение:

q=10.

Вводим значение магнитной постоянной в Гн/м:

$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

Для любых $B > B_q$ и $H > H_q$ добавляем снизу векторов vB и vH значения vB_{q+1} и vH_{q+1} для линейного участка кривой B(H) с тангенсом угла наклона к оси H, равным μ_0 (с учетом масштабов по B и H). Вводим

$vB_{q+1} := 2.5$.

Рассчитываем

$$vH_{q+1} := vH_q + \frac{vB_{q+1} - vB_q}{\mu_0}.$$

Матрица ВН и векторы, которые участвуют в дальнейших преобразованиях:

BH =

	0	1
0	0	0
1	0.4	120
2	0.8	170
3	1	220
4	1.2	320
5	1.4	650
6	1.6	$2 \cdot 10^3$
7	1.8	$7.5 \cdot 10^3$
8	2	$1.8 \cdot 10^4$
9	2.2	$4.7 \cdot 10^4$
10	2.3	$1 \cdot 10^5$

vB =

	0
0	0
1	0.4
2	0.8
3	1
4	1.2
5	1.4
6	1.6
7	1.8
8	2
9	2.2
10	2.3
11	2.5

vH =

	0
0	0
1	120
2	170
3	220
4	320
5	650
6	$2 \cdot 10^3$
7	$7.5 \cdot 10^3$
8	$1.8 \cdot 10^4$
9	$4.7 \cdot 10^4$
10	$1 \cdot 10^5$
11	$2.592 \cdot 10^5$

Вводим номер sp строк векторов vB и vH. Для элементов vB и vH с номерами, меньшими и равными sp, проводится сплайн-интерполяция, равными и большими sp — линейная интерполяция:

sp:=6.

Проверяем значения sp-тых элементов векторов vB и vH:

$vB_6 = 1.6$; $vB_{sp} = 1.6$; $\frac{vH_6}{1000} = 2$; $vH_{sp} = 2 \cdot 10^3$.

Верхние части векторов vB и vH, включая строку с номером sp, выделяем в отдельные векторы Bsl и Hsl для кубической сплайн-интерполяции:

Bsl:=submatrix(vB, 0, sp, 0, 0); Hsl:=submatrix(vH, 0, sp, 0, 0).

Дискретная переменная порядковых номеров элементов векторов **Bsl** и **Hsl**:

kl: = 0..sp.

Проверяем значения **sp**-го элемента вектора **Bsl**:

$Bsl_6 = 1.6.$

Нижние части векторов vB и vH, включая строку с номером sp, выделяем в отдельные векторы Bl и Hl для линейной интерполяции:

Bl: = submatrix(vB, sp, q + 1, 0, 0); Hl: = submatrix(vH, sp, q + 1, 0, 0).

Дискретная переменная порядковых номеров элементов векторов **Bl** и **Hl**:

k2: = 0..q + 1 − sp.

Значения введенных и рассчитанных величин:

$Bl_0 = 1.6; \quad Hl_0 = 2 \cdot 10^3; \quad Bsl_{sp} = 1.6; \quad Hsl_{sp} = 2 \cdot 10^3; \quad Hl_0 = 2 \cdot 10^3.$

$$Bsl = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 0.8 \\ 1 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.6 \end{bmatrix} \quad Hsl = \begin{bmatrix} 0 \\ 120 \\ 170 \\ 220 \\ 320 \\ 650 \\ 2 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad Bl = \begin{bmatrix} 1.6 \\ 1.8 \\ 2 \\ 2.2 \\ 2.3 \\ 2.5 \end{bmatrix} \quad Hl = \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^3 \\ 7.5 \cdot 10^3 \\ 1.8 \cdot 10^4 \\ 4.7 \cdot 10^4 \\ 1 \cdot 10^5 \\ 2.592 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{c} k1 \\ \hline 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \quad \begin{array}{c} k2 \\ \hline 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array}$$

При сплайн-интерполяции будем пользоваться функцией **lspline**, которая генерирует кривую, приближающуюся к прямой линии в граничных точках. Использование для этих целей функций **pspline** (в граничных точках кривая приближается к параболе) и **cspline** (в граничных точках кривая приближается к кубическому полиному) дали худшие результаты.

---

ls: = lspline(Hsl, Bsl).

Введем функцию **B(H)**, по которой можно по любому значению напряженности магнитного поля H > = 0 рассчитать значение магнитной индукции B. Она состоит из двух стандартных функций **if**, которым присваиваются имена **B1(H)** и **B2(H)**. Функция **if** в диапазоне значений H, указанных первым аргументом (т. е. когда выполняется условие, стоящее на месте первого аргумента), возвращает значение, указанное вторым аргументом. Если условие, стоящее на месте первого аргумента, не выполняется, то функция **if** возвращает значение, стоящее на месте третьего аргумента.

$B1(H) := if(0 \leqslant H \leqslant Hsl_{sp}, interp(ls, Hsl, Bsl, H), 0);$

$B2(H) := if(H > Hl_0, linterp(Hl, Bl, H), 0);$

$B(H) := B1(H) + B2(H).$

Магнитные проницаемости: абсолютная в Гн/м

$$\mu(H) := \frac{B(H)}{H},$$

относительная $\mu r(H) := \frac{\mu(H)}{\mu_0}$.

Построим: значения узловых точек векторов **Bsl и Hsl** (кружки на графиках) по дискретной переменной **k1** (их индекс); значения узловых точек векторов **Bl** и **Hl** (крестики на графиках) по дискретной переменной **k2** (их индекс) и функцию **B(H)**. Для построения функции **B(H)** ее аргумент H представим в виде дискретной переменной, которая на рис. 1 изменяется с шагом 1000 А/м и охватывает напряженности до 400000 А/м, на рис. 2 шаг равен 100 А/м, на рис. 3, 4 и 5 — 10 А/м. Параллельно с кривыми намагничивания на рис. 1, 2 и 5 строятся кривые зависимости абсолютной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. Напряженность магнитного поля для рис. 1 $H := 0,1000..4\cdot10^5$; для рис. 2 $H := 0,100..10\cdot10^3$.

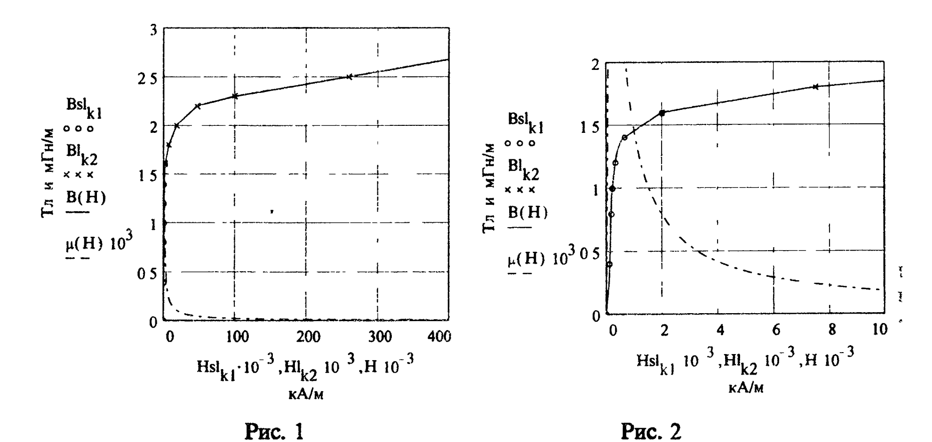


Рис. 1 Рис. 2

Кривая **B(H)** на рис. 1 показывает, что аппроксимирующая функция осуществляет не только интерполяцию (проводит кривые между опорными точками), но и экстраполяцию (проводит продолжение кривой за пределами крайней опорной точки). Так, при координатах крайней правой опорной точки **B** = 2.5 Тл, **H** = $2.592\cdot10^5$ А/м MCAD на рис. 1 строит кривую до напряженности магнитного поля $H = 4\cdot10^5$ А/м.

На рис. 1 видны легкие изломы кривой в узловых точках, выше точки, в которой **sp** = 6, **k1** = 6, **k2** = 0 и **B** = 1.6 Тл.

Напряженность магнитного поля для рис. 3 -- 6 H: 0,10..1000.

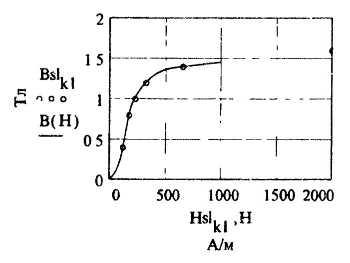


Рис. 3

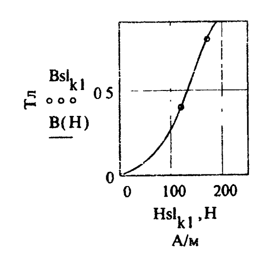


Рис. 4

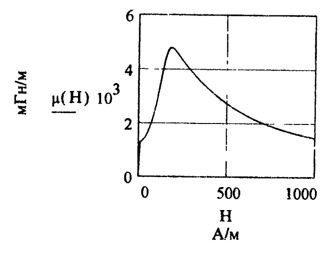




Рис. 5

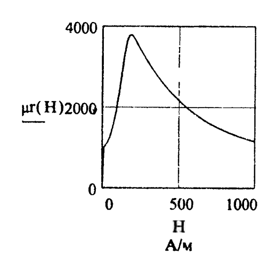


Рис. 6

На рис. 2 имеется легкий излом при B=1,6 Тл (в точке перехода от сплайн-интерполяции к линейной). На рис. 3 и 4 изломы отсутствуют, потому что сплайн-интерполяция, проведенная нами при $B \leqslant 1.6$ Тл, дает более плавную кривую, чем линейная интерполяция при $B \geqslant 1.6$ Тл. На рис. 1 для $B > 1.6$ Тл более плавную кривую можно получить путем увеличения числа узловых точек. Использование сплайн-интерполяции при этих магнитных индукциях дает удовлетворительный результат только при неоправданно большом количестве узловых точек (подробнее — см. п. 3.1 и рис. 3.2 гл. 3).

Рис. 1, 2 и 3 показывают, что диапазон значений магнитных индукций и напряженностей магнитного поля, соответствующий переходу от крутого подъема кривой намагничивания к ее пологому участку (так называемое «колено»), — понятие, которое в значительной степени зависит от масштабов осей **B** и **H** построения кривой намагничивания.

На рис. 5 и 6 изображены кривые изменения абсолютной и относительной магнитных проницаемостей от напряженности магнитного поля в диапазоне от 0 до 1000 А/м.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

АППРОКСИМАЦИЯ КРИВЫХ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАТЕРИАЛА ОТ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ H(B).mcd)

Приведены два типа кривых **H(B)**: *1) только для положительных магнитных индукций и 2) для любых по знаку магнитных индукций — кривая, обладающая центральной симметрией (ее можно использовать для расчета магнитных цепей переменного тока).*

Под кривой H(B) зависимости напряженности магнитного поля от магнитной индукции имеется в виду основная кривая намагничивания, построенная так, что по оси абсцисс откладывается магнитная индукция **B**, а по оси ординат — напряженность магнитного поля **H**.

....

Здесь опущена часть, повторяющая строки рабочего документа B(H) (Приложение 1), расположенные в нем между горизонтальными точечными линиями.

....

lsH:=lspline(Bsl,Hsl)

Введем функцию **H(B)**, по которой можно по любому значению магнитной индукции $B \geqslant 0$ рассчитать значение напряженности магнитного поля H. Она состоит из двух стандартных функций **if**, которым присваиваются имена **H1(B)** и **H2(B)**. Функция **if** в диапазоне значений **B**, указанных первым аргументом (т. е. когда

выполняется условие, стоящее на месте первого аргумента), возвращает значение, указанное вторым аргументом. Если условие, стоящее на месте первого аргумента, не выполняется, то функция **if** возвращает значение, стоящее на месте третьего аргумента.

$H1(B):=if(0\leqslant B\leqslant Bsl_{sp},interp(lsH,Bsl,Hsl,B),0);$

$H2(B):=if(B>Bl_0,linterp(Bl,Hl,B),0);$

$H(B):=H1(B)+H2(B).$

Магнитная проницаемость абсолютная

$$\mu(B):=\frac{B}{H(B)};$$

относительная

$$\mu r(B):=\frac{\mu(B)}{\mu_0}.$$

Введем дискретную переменную для построения графиков

B:=0,0.01..2.6.

Кривые зависимости напряженности магнитного поля от магнитной индукции построены на рис. 1 и 2.

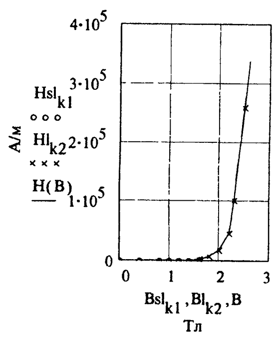


Рис. 1

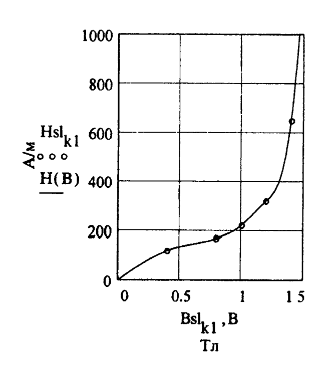


Рис. 2

Дискретная переменная для построения кривой на рис. 5

B:=0,0.1..10.

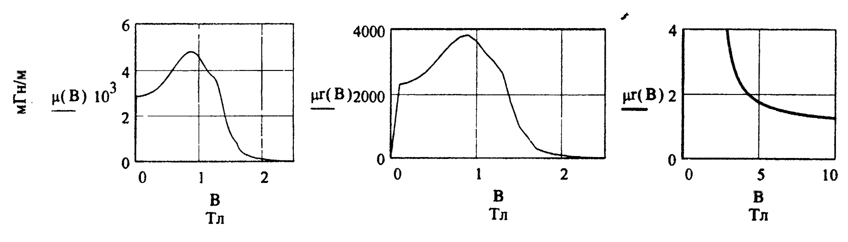


Рис. 3. Рис. 4 Рис. 5

Кривые зависимости магнитной проницаемости от магнитной индукции построены на рис. 3 — 5. Последний показывает, что даже при индукции 10 Тл относительная магнитная проницаемость стали 10895 (и любого другого магнитного материала) больше 1. Рис. 3 и 4 позволяют сделать заключение о том, что свойство стали 10895 уменьшать магнитное сопротивление путей потока наиболее сильно будет проявляться при магнитных индукциях в диапазоне от близких к нулю до 1,6 Тл.

Кривая H(B) с центральной симметрией строится аналогичным образом:

$H1(B) := if(0 \leqslant B \leqslant Bsl_{sp}, interp(lsH, Bsl, Hsl, B), 0);$ (1)

$H2(B) := if(B > Bl_0, linterp(Bl, Hl, B), 0);$ (2)

$H3(B) := if(-Bsl_{sp} \leqslant B \leqslant 0, -interp(lsH, Bsl, Hsl, -B), 0);$ (3)

$H4(B) := if(B < -Bl_0, -linterp(Bl, Hl, -B), 0);$ (4)

$H(B) := H1(B) + H2(B) + H3(B) + H4(B).$

Проверка значений векторов Bsl и Bl в точке, в которой сплайн-интерполяция переходит в линейную интерполяцию:

$Bsl_{sp} = 1.6;\ Bl_0 = 1.6.$

Дискретная переменная для построения кривых на рис. 6. и 7:

$B := -2.62, -2.61..2.62.$

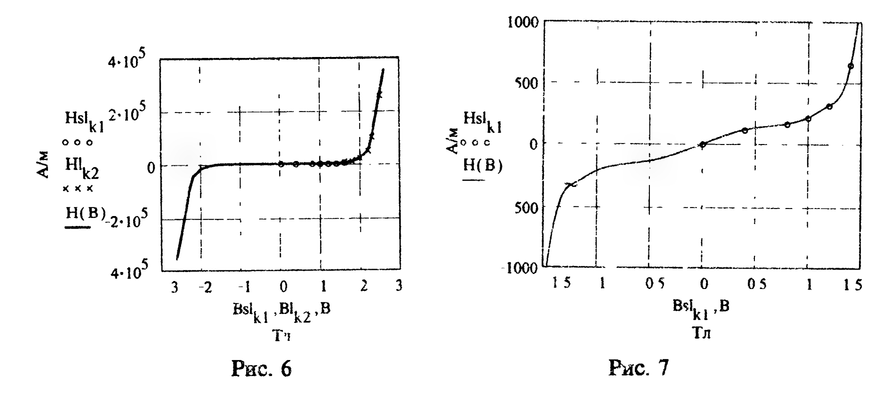


Рис. 6 Рис. 7

Кривые на рис. 1 и 6 показывают, что аппроксимирующие формулы позволяют провести не только интерполяцию (проведение кривых между опорными точками), но и экстраполяцию (проведение продолжений кривых за пределами крайних опорных точек. Так, при положительных значениях **B** и **H** крайняя опорная точка имеет координаты **B**=2.5 Тл, **H**=$2.592 \cdot 10^5$ А/м. На рис. 1 и 6 построены кривые до магнитных индукций **B**=2.62 Тл.

На рис. 7 изображена часть рассмотренной кривой в большем масштабе. Она показывает, что большее число опорных точек могло бы передать характер кривой H(B) более правдоподобно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

АППРОКСИМАЦИЯ СИММЕТРИЧНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ H(B)LOOP.mcd)

Петля представлена в виде зависимости напряженности магнитного поля H от магнитной индукции B. Если максимальная магнитная индукция меньше индукции, при которой происходит техническое насыщение материала, то строится симметричная непредельная петля; если равна — строится предельная симметричная; больше — к предельной симметричной добавляются линейные участки на концах.

Исходные данные

В этом документе проводится построение динамической петли гистерезиса стали 1212 толщиной 0.5 мм при частоте 50 Гц. При этом обеспечивается максимальная магнитная индукция **Bm** = 1.5 Тл и максимальная напряженность магнитного поля 2000 А/м (см. [12], с. 98).

Вводятся координаты точек только тех частей симметричной петли гистерезиса, которые соответствуют положительным значениям напряженности магнитного поля. Значения вектора **Bu** — магнитные индукции точек восходящей части петли в Тл, **Hu** — напряженности магнитного поля тех же точек в А/м. Для нисходящей части петли гистерезиса аналогичные координаты вводятся в векторы **Bd** и **Hd**.

Порядок нумерации элементов векторов **Bu** и **Hu** восходящей ветви петли гистерезиса совпадает с направлением движения по петле при намагничивании. Порядок нумерации элементов векторов **Bd** и **Hd** нисходящей ветви петли гистерезиса принят противоположным движению по петле при размагничивании. Так, размагничивание начинается от точки с координатами Bd_{md}, Hd_{md}, имеющей порядковый номер **d** = **md** = 6, и заканчивается точкой с координатами Bd_0, Hd_0, имеющей порядковый номер **d** = 0.

....

$$Bu = \begin{bmatrix} -0.88 \\ -0.6 \\ 0.3 \\ 0 \\ 0.3 \\ 0.6 \\ 0.9 \\ 1.02 \\ 1.2 \\ 1.28 \\ 1.38 \\ 1.5 \end{bmatrix} \quad Hu = \begin{bmatrix} 0 \\ 70 \\ 110 \\ 130 \\ 160 \\ 200 \\ 270 \\ 320 \\ 500 \\ 700 \\ 1200 \\ 2000 \end{bmatrix} \quad Bd = \begin{bmatrix} 0.88 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.26 \\ 1.38 \\ 1.45 \\ 1.5 \end{bmatrix} \quad Hd = \begin{bmatrix} 0 \\ 160 \\ 250 \\ 320 \\ 700 \\ 1200 \\ 2000 \end{bmatrix}$$

Необходимость выбора порядка нумерации векторов **Bd** и **Hd** противоположной движению по петле при размагничивании вызвана тем, что элементы векторов **Bd** и **Bu** должны располагаться для дальнейшей их сплайн-интерполяции в порядке возрастания.

Расчет числа элементов векторов и ввод дискретной переменной для восходящей части петли:

mu: = rows(Bu) − 1; u: = 0..mu;

для нисходящей части петли:

md: = rows(Bd) − 1; d: = 0..md.

Магнитная постоянная

$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

Координаты вершины петли гистерезиса:

$Bm := Bd_{md}$; $Hm := Hd_{md}$.

Остаточная магнитная индукция:

$Br := Bd_0$.

Рассчитаем эти величины: $Bm = 1.5$; $Hm = 2 \cdot 10^3$; $Br = 0.88$.

Результаты ввода координат восходящей части петли гистерезиса в форме таблиц:

Bu =

	0
0	-0.88
1	-0.6
2	-0.3
3	0
4	0.3
5	0.6
6	0.9
7	1.02
8	1.2
9	1.28
10	1.38
11	1.5

Hu =

	0
0	0
1	70
2	110
3	130
4	160
5	200
6	270
7	320
8	500
9	700
10	$1.2 \cdot 10^3$
11	$2 \cdot 10^3$

Сначала построим верхнюю половину петли по введенным данным. Автоматически при этом происходит линейная интерполяция между опорными точками (рис. 1).

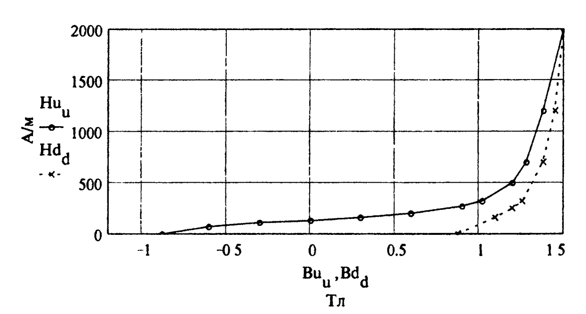


Рис. 1

....

Для получения функций, которые можно было бы использовать в расчетах, проведем сплайн-интерполяцию. Векторы вторых производных для интерполяционных функций:

su: = lspline(Bu,Hu); sd: = lspline(Bd,Hd).

Для восходящей ветви петли гистерезиса введем функцию **Hup(B)**, по которой можно по любому значению магнитной индукции **B** рассчитать значение напряженности магнитного поля **Hup**. Она состоит из четырех стандартных функций **if**, которым присваиваются имена **Hup1(B)**, **Hup2(B)**, **Hup3(B)** и **Hup4(B)**. Функция **if**

в диапазоне значений **B**, указанных первым аргументом (т. е. когда выполняется условие, стоящее на месте первого аргумента), возвращает значение, указанное вторым аргументом. Если условие, стоящее на месте первого аргумента, не выполняется, то функция **if** возвращает значение, стоящее на месте третьего аргумента. Составляющая **Hup1(B)** интерполирует ту часть восходящей ветви петли гистерезиса, которая соответствует отрицательным значениям напряженностей магнитного поля; составляющая **Hup2(B)** соответствует положительным **H**; **Hup3(B)** — для прямолинейного конца петли при **H > Hm**; **Hup4(B)** — для прямолинейного конца при **H < −Hm**. Прямолинейные концы добавлены к петле гистерезиса по двум причинам: 1) они делают работу функций **Hup(B)** и **Hdn(B)** вблизи точек с магнитной индукцией **Bm** и **−Bm** более стабильной и 2) они позволяют экстраполировать петлю гистерезиса на магнитные индукции **B > Bm** и **B < −Bm**. Эта экстраполяция даст удовлетворительные результаты только в том случае, если введены координаты предельной симметричной петли гистерезиса, а **Bm** и **Hm** соответствуют магнитной индукции и напряженности, при которых наступает техническое насыщение материала. Тангенс угла наклона прямолинейных концов петли гистерезиса к вертикали, которые вводятся в строках (3), (4), (7) и (8), принят равным магнитной постоянной μ_0 с учетом масштабов осей **B** и **H**.

$$\mathrm{Hup1(B)} := \mathrm{if}(-\mathrm{Bm} \leqslant \mathrm{B} < -\mathrm{Br}, -\mathrm{interp}(\mathrm{sd,Bd,Hd},-\mathrm{B}),0); \tag{1}$$

$$\mathrm{Hup2(B)} := \mathrm{if}(-\mathrm{Br} \leqslant \mathrm{B} \leqslant \mathrm{Bm}, \mathrm{interp}(\mathrm{su,Bu,Hu,B}),0); \tag{2}$$

$$\mathrm{Hup3(B)} := \mathrm{if}\left(\mathrm{B} > \mathrm{Bm}, \mathrm{Hm} + \frac{\mathrm{B}-\mathrm{Bm}}{\mu_0}, 0\right); \tag{3}$$

$$\mathrm{Hup4(B)} := \mathrm{if}\left(\mathrm{B} < -\mathrm{Bm}, -\mathrm{Hm} + \frac{\mathrm{B}+\mathrm{Bm}}{\mu_0}, 0\right); \tag{4}$$

$$\mathrm{Hup(B)} := \mathrm{Hup1(B)} + \mathrm{Hup2(B)} + \mathrm{Hup3(B)} + \mathrm{Hup4(B)}.$$

Для нисходящей ветви петли по аналогии с (1) — (4):

$$\mathrm{Hdn1(B)} := \mathrm{if}(\mathrm{Br} \leqslant \mathrm{B} \leqslant \mathrm{Bm}, \mathrm{interp}(\mathrm{sd,Bd,Hd,B}),0); \tag{5}$$

$$\mathrm{Hdn2(B)} := \mathrm{if}(-\mathrm{Bm} \leqslant \mathrm{B} \leqslant \mathrm{Br}, -\mathrm{interp}(\mathrm{su,Bu,Hu},-\mathrm{B}),0); \tag{6}$$

$$\mathrm{Hdn3(B)} := \mathrm{if}\left(\mathrm{B} > \mathrm{Bm}, \mathrm{Hm} + \frac{\mathrm{B}-\mathrm{Bm}}{\mu_0}, 0\right); \tag{7}$$

$$\mathrm{Hdn4(B)} := \mathrm{if}\left(\mathrm{B} < -\mathrm{Bm}, -\mathrm{Hm} + \frac{\mathrm{B}+\mathrm{Bm}}{\mu_0}, 0\right); \tag{8}$$

$$\mathrm{Hdn(B)} := \mathrm{Hdn1(B)} + \mathrm{Hdn2(B)} + \mathrm{Hdn3(B)} + \mathrm{Hdn4(B)}.$$

Проверим значения введенных функций в некоторых точках:

$\mathrm{Hup}(1.5) = 2 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hup}(1.495) = 1.965 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hup}(1.499) = 1.993 \cdot 10^3$;

$\mathrm{Hdn}(1.5) = 2 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hdn}(1.495) = 1.911 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hdn}(1.499) = 1.982 \cdot 10^3$;

$\mathrm{Hup}(1.501) = 2.796 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hup}(1.4999999) = 2 \cdot 10^3$; $\mathrm{Hdn}(1.501) = 2.796 \cdot 10^3$;

$\mathrm{Hdn}(1.4999999) = 2 \cdot 10^3$.

Для построения аппроксимирующих кривых (рис. 2) введем дискретную переменную изменения магнитной индукции. Этот диапазон может быть шире, чем от **−Bm** до **+Bm**, как показано здесь, только в том случае, когда введены координаты

предельной симметричной петли гистерезиса, а значения **Bm** и **Hm** соответствуют точке, при которой происходит техническое насыщение материала.

$$B := -Bm, -0.99 \cdot Bm..Bm. \qquad (9)$$

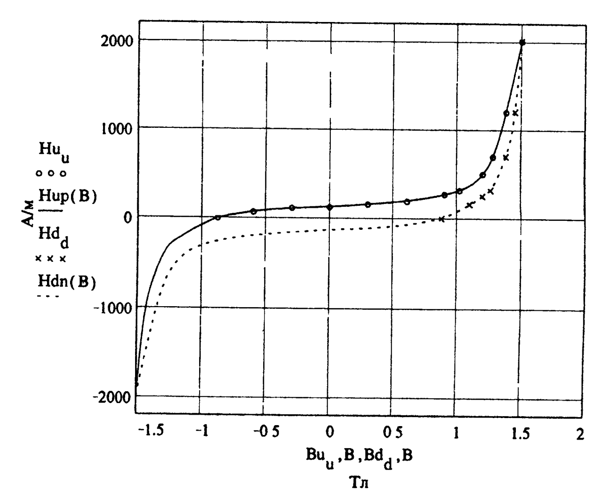


Рис. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКА В ЦЕПИ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА (ДОКУМЕНТ VD.mcd)

Потери в магнитопроводе не учитываются. Векторная диаграмма строится на декартовом графике в виде функций и параметрических линий, так как специального средства для построения векторных диаграмм MCAD не имеет. Под термином вектор в этом документе имеется в виду только направленный отрезок прямой линии.

Исходные данные

Активное сопротивление обмотки в Ом:

$R := 100.$

Индуктивность в Гн:

$L := 0.2.$

Угловая частота в 1/с:

$\omega := 314.$

Действующий ток в А:

$I := 1.$

Тангенс угла между направлением любого вектора и направлениями двух отрезков прямых линий, образующих наконечник стрелки этого вектора на диаграмме:

$$tg\alpha := 0.1. \qquad (1)$$

Расчет величин, необходимых для построения векторной диаграммы

Индуктивное сопротивление обмотки:

$X_L := \omega \cdot L.$

Ее комплексное сопротивление

$Z := R + X_L \cdot j; \quad Z = 100 + 62.8j.$

Напряжение источника питания

$U := I \cdot Z; \quad U = 100 + 62.8j.$

Функция **arg** определяет угол в комплексной плоскости между положительным направлением вещественной оси и ее аргументом. В нашем случае это угол отставания тока от напряжения

$\varphi := \arg(Z); \quad \varphi = 0.561.$

Напряжение на активном сопротивлении

$IR := I \cdot R; \quad IR := 100.$

Для изображения вектора этого напряжения на декартовом графике введем дискретную переменную

$r := 0, 0.5 \cdot IR..IR.$ (2)

Если вектор напряжения на активном сопротивлении на векторной диаграмме совместить с осью действительных величин комплексной плоскости, а последнюю — с осью абсцисс декартова графика, то при любом значении дискретной переменной **r** ординаты, которые должны изобразить вектор **IR** на графике, равны нулю. Таким образом, вектор **IR** можно нарисовать, если вдоль оси ординат ввести 0 (на графике он сверху слева от этой оси), а вдоль оси абсцисс — дискретную переменную **r** (самая левая под этой осью).

Принимаем длину проекции наконечника любого вектора на направление последнего равной 0.1 длины вектора напряжения **IR** на активном сопротивлении:

$N := 0.1 \cdot IR.$ (3)

Введем дискретную переменную для построения каждой из двух прямых линий, из которых состоит каждый наконечник:

$n := 0, 0.5 \cdot N..N.$ (4)

Верхнюю прямую линию наконечника вектора **IR** на декартовом графике можно отобразить с помощью двух одномерных массивов: в массиве $\mathbf{x12_n}$ сосредоточены абсциссы точек этой прямой, а в одномерном массиве $\mathbf{y1_n}$ — ординаты этих точек. Абсциссы точек нижней прямой линии наконечника этого вектора такие же, как у верхней, а ординаты — в одномерном массиве $\mathbf{y2_n}$:

$x12_n := IR - n; \quad y1_n := n \cdot tg\alpha; \quad y2_n := -n \cdot tg\alpha.$ (5)

Напряжение на индуктивном сопротивлении

$IX := I \ X_L; \quad IX = 62.8.$

Дискретная переменная

$m := 0..10.$ (6)

Все точки, из которых можно сформировать вектор напряжения на индуктивном сопротивлении, на декартовом графике имеют одинаковые абсциссcы, равные **IR**. На рис. 1 аргумент **IR** — четвертый слева под осью абсцисс.

Ординаты этих точек собраны в другом одномерном массиве:

$$U_{X_m} := IX \cdot m \cdot 0.1.$$

Абсциссы левой $\mathbf{x3_n}$ и правой $\mathbf{x4_n}$ частей наконечника вектора **IX**, а также их одинаковые ординаты $\mathbf{y34_n}$ собраны в следующие одномерные массивы:

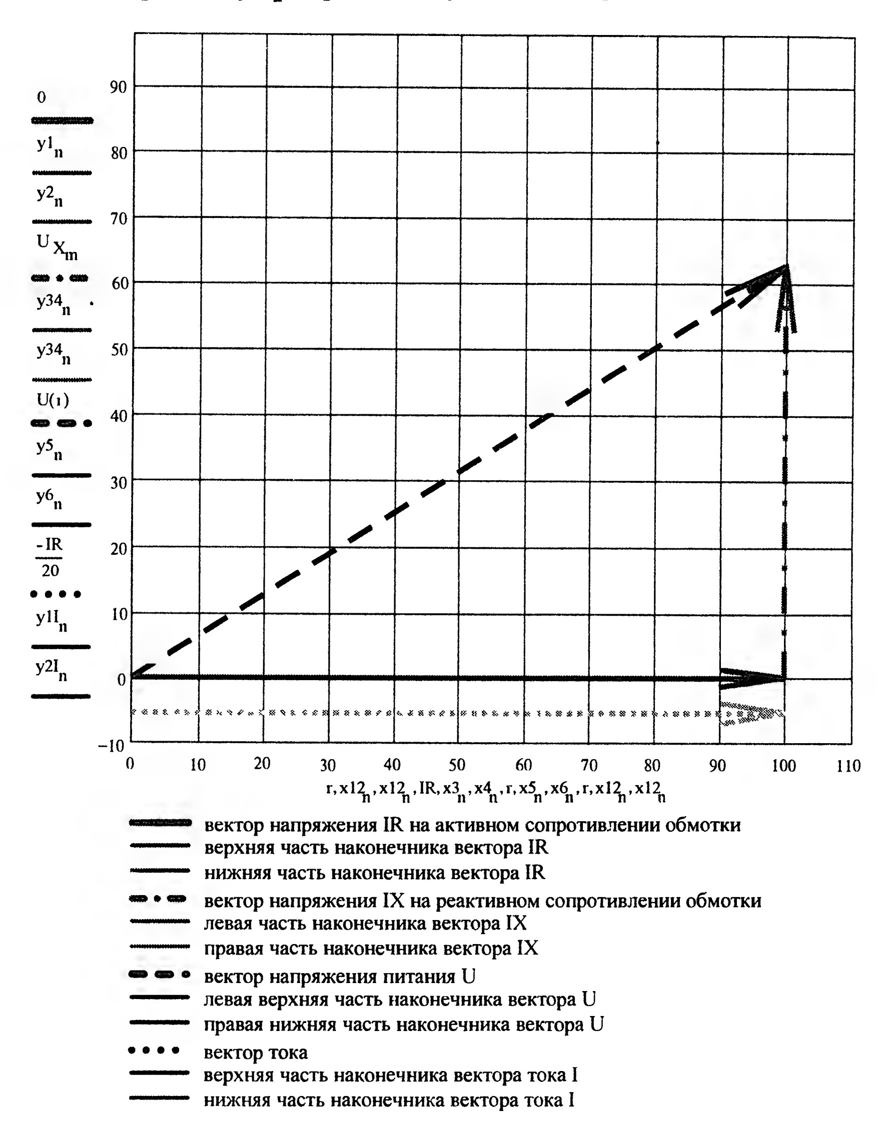


Рис. 1

$x3_n := IR - n \cdot tg\alpha; \quad x4_n := IR + n \cdot tg\alpha; \quad y34_n := IR \cdot \tan(\varphi) - n.$ (7)

Вектор напряжения источника питания

На декартовом графике его можно изобразить в виде функции

$U(r) := r \cdot \tan(\varphi).$

Модуль напряжения питания

$mU := \sqrt{IR^2 + IX^2}; \quad mU = 118.084.$

Координаты левой верхней части наконечника стрелки вектора U собраны в одномерных массивах $x5_n$ и $y5_n$, а правой верхней — в массивах $x6_n$ и $y6_n$:

$x5_n := (mU - n) \cdot \cos(\varphi) - n \cdot tg\alpha \cdot \sin(\varphi); \quad y5_n := (mU - n) \cdot \sin(\varphi) + n \cdot tg\alpha \cdot \cos(\varphi);$ (8)

$x6_n := (mU - n) \cdot \cos(\varphi) + n \cdot tg\alpha \cdot \sin(\varphi); \quad y6_n := (mU - n) \cdot \sin(\varphi) - n \cdot tg\alpha \cdot \cos(\varphi).$ (9)

Вектор тока

Вектор тока **I** можно изобразить в виде стрелки, параллельной вектору **IR**. Если увеличить вектор тока **I** в **R** раз, то длина его на графике будет равна длине вектора **IR**. Изобразим его на диаграмме ниже вектора **IR** на **IR/20** (при этом все ординаты его будут равны **−IR/20**). Ординаты его наконечника:

$y1I_n := y1_n - \frac{IR}{20}; \quad y2I_n := y2_n - \frac{IR}{20}.$

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

НАГРЕВ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДНИКА ВО ВРЕМЕНИ ПРИ НЕИЗМЕННЫХ ТОКЕ, МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИИ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ TIPU.mcd)

Учитывается влияние превышения температуры на коэффициент теплоотдачи k_T. Исходное дифференциальное уравнение 1-го порядка (уравнение теплового баланса) $P = k_T \cdot S \cdot \tau + c \cdot m \cdot d\tau/dt$ приводится к виду $d\tau/dt = -k_T \cdot S \cdot \tau/(c \cdot m) + P/(c \cdot m)$, где $k_T = 2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau) \cdot S^{-1/3}$ (удельный обобщенный коэффициент теплоотдачи обмотки при $10^{-4} < S < 10^{-2}$ м²), и решается с помощью функции **rkfixed**. Здесь и далее приняты следующие обозначения: **P** — мощность, Вт; **S** — площадь поверхности теплоотдачи, м²; τ — превышение температуры, К; **c** — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); **m** — масса, кг; **t** — время, с; **U** — напряжение, В; **I** — ток, А; **R** — активное сопротивление, Ом; k_T — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); α — температурный коэффициент сопротивления, 1/К. Во всех случаях учитывается влияние температуры на сопротивление по формуле $R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \tau)$. Все величины с индексом **20** — при 20 °С, с индексом **у** — при установившейся температуре. Влиянием температуры на удельную теплоемкость с пренебрегаем.

Исходные данные и предварительные расчеты

$m := 0.081; \quad I_{20} := 0.19417; \quad P_{20} := 9.32; \quad \alpha_{20} := 0.0039; \quad S := 0.00385; \quad c := 390;$

$R_{20} := \frac{P_{20}}{I_{20}^2}; \quad R_{20} = 247.202; \quad U_{20} := \frac{P_{20}}{I_{20}}; \quad U_{20} = 47.999.$

Исходные значения превышения температуры

$\tau_{P_0} := 0;\quad \tau_{U_0} := 0;\quad \tau_{I_0} := 0.$

Расчеты

1. Для неизменного тока (все величины в индексе содержат букву I)

$I := I_{20};$

$$D_I(t_I \cdot \tau_I) := -\frac{2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau_{I_0}) \cdot S^{\frac{2}{3}}}{c \cdot m} \cdot \tau_{I_0} + \frac{I^2 \cdot R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \tau_{I_0})}{c \cdot m}; \qquad (1)$$

$Z_I := \mathrm{rkfixed}(\tau_I, 0, 100 \cdot 60, 100, D_I);$ (2)

$t_I := Z_I^{<0>};\quad \tau_I := Z_I^{<1>};\quad \tau_{I_{80}} = 162.833.$ (3)

2. Для неизменной мощности (все величины в индексе содержат букву P)

$P := P_{20};$

$$D_P(t_P, \tau_P) := -\frac{2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau_{P_0}) \cdot S^{\frac{2}{3}}}{c \cdot m} \cdot \tau_{P_0} + \frac{P}{c \cdot m}; \qquad (4)$$

$Z_P := \mathrm{rkfixed}(\tau_P, 0, 100 \cdot 60, 100, D_P);$

$t_P := Z_P^{<0>};\quad \tau_P := Z_P^{<1>};\quad \tau_{P_{80}} = 114.789.$

3. Для неизменного напряжения (все величины в индексе содержат букву U)

$U := U_{20};$

$$D_U(t_U, \tau_U) := -\frac{2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau_{U_0}) \cdot S^{\frac{2}{3}}}{c \cdot m} \cdot \tau_{U_0} + \frac{U^2}{R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \tau_{U_0}) \cdot c \cdot m}; \qquad (5)$$

$Z_U := \mathrm{rkfixed}(\tau_U, 0, 100 \cdot 60, 100, D_U);$

$t_U := Z_U^{<0>};\quad \tau_U := Z_U^{<1>};\quad \tau_{U_{80}} = 91.41.$

Далее t используется в качестве дискретной переменной, она совпадает также с временем в минутах

$t := 0..100.$

Зависимости превышения температуры от времени для трех рассмотренных случаев приведены на рис. 1. Из него следует, что текущее превышение температуры и особенно его установившееся значение сильно зависит от режима работы электротехнического устройства, т. е. от того, какая величина (ток, мощность или напряжение) при нагревании остается неизменной.

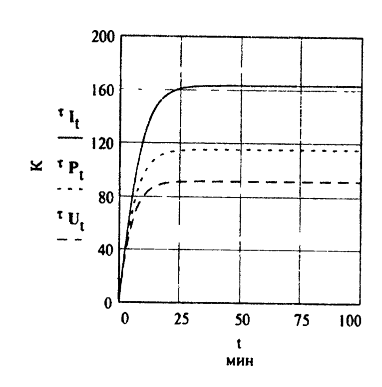


Рис. 1

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

НАГРЕВ ОДНОРОДНОГО ПРОВОДНИКА ВО ВРЕМЕНИ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ TU.mcd)

Не учитывается (пп. 1 и 3 основных расчетов текущего документа) и учитывается (п. 2) влияние превышения температуры на коэффициент теплоотдачи $\mathbf{k_T}$. Исходное дифференциальное уравнение 1-го порядка (уравнение теплового баланса) $\mathbf{P = k_T \cdot S \cdot \tau + c \cdot m \cdot d\tau/dt}$ приводится к виду $\mathbf{d\tau/dt = -k_T \cdot S \cdot \tau/(c \cdot m) + U^2/(R \cdot c \cdot m)}$ и решается с помощью функции **rkfixed**. Здесь и далее приняты следующие обозначения: **P** — мощность, Вт; **S** — площадь поверхности теплоотдачи, м^2; τ — превышение температуры, К; **c** — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); **m** — масса, кг; **t** — время, с; **U** — напряжение, В; **R** — активное сопротивление, Ом; $\mathbf{k_T}$ — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2 · К); α — температурный коэффициент сопротивления, 1/К.

В случае 2 в уравнение подставляется $\mathbf{k_T = 2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau) \cdot S^{-1/3}}$ (удельный обобщенный коэффициент теплоотдачи обмотки при $10^{-4} < S < 10^{-2}$ м^2). Во всех случаях учитывается влияние температуры на сопротивление по формуле $\mathbf{R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \tau)}$. Все величины с индексом **20** — при 20 °C, с индексом **y** — при установившейся температуре. Влиянием температуры на удельную теплоемкость пренебрегаем.

Исходные данные и предварительные расчеты

$$m := 0.081;\quad U := 48;\quad R_{20} := 247.21;\quad \alpha_{20} := 0.0039;\quad S := 0.00385;\quad c := 390;\quad P_{20} := \frac{U^2}{R_{20}}.$$

Расчет дает

$P_{20} = 9.32.$

Векторы превышений температуры и коэффициентов теплоотдачи:

$$\tau_{KT} := \begin{pmatrix} 0 \\ 91.41 \end{pmatrix};\quad k_T := 2.1 \cdot \frac{1 + 0.005 \cdot \tau_{KT}}{\sqrt[3]{S}};\quad k_T = \begin{pmatrix} 13.399 \\ 19.523 \end{pmatrix}.$$

Значения коэффициентов теплоотдачи при 20 °C и при установившейся температуре:

$k_{T20} := 13.399;\quad k_{Ty} := 19.523.$

Сопротивление при 20 °C и мощность при установившейся температуре:

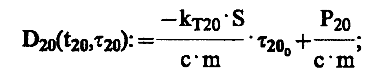
$$R_y := R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot 91.41);\quad P_y := \frac{U^2}{R_y};\quad P_y = 6.871.$$

Исходные значения превышения температуры в случаях 1, 2 и 3 соответственно:

$\tau_{20_0} := 0;\quad \tau_0 := 0;\quad \tau_{y_0} := 0.$

Основные расчеты

1. Для коэффициента теплоотдачи $\mathbf{k_{T20}}$, определенного при температуре окружающей среды (не учитывается влияние τ на $\mathbf{k_{T20}}$)



$$D_{20}(t_{20},\tau_{20}) := \frac{-k_{T20} \cdot S}{c \cdot m} \cdot \tau_{20_0} + \frac{P_{20}}{c \cdot m};$$

$Z_{20} := \mathrm{rkfixed}(\tau_{20}, 0, 100 \cdot 60, 100, D_{20});$

$t := 0..100; \quad t_{20} := Z_{20}^{<0>};$

$\tau_{20} := Z_{20}^{<1>}; \quad \tau_{20_{80}} = 180.598.$

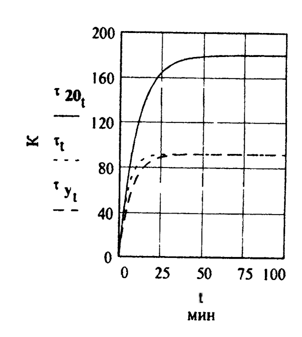


Рис. 1

2. Для

$k_T = 2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau) \cdot S^{-1/3}$

(учитывается влияние τ на k_T)

$$D(t_U,\tau) := -\frac{2.1 \cdot (1 + 0.005 \cdot \tau_0) \cdot S^{\frac{2}{3}}}{c \cdot m} \cdot \tau_0 + \frac{P_{20}}{(1 + \alpha_{20} \cdot \tau_0) \cdot c \cdot m};$$

$Z := \mathrm{rkfixed}(\tau, 0, 100 \cdot 60, 100, D); \; t_U := Z^{<0>}; \; \tau := Z^{<1>}; \; \tau_{80} = 91.41.$

3. Для коэффициента теплоотдачи k_{T_y}, определенного при установившейся температуре $\tau_y + 20 = 91.41 + 20 = 111.41$ К, рассчитанной предварительно в п. 2 (не учитывается влияние τ на k_{T_y})

$$D_y(t_y,\tau_y) := -\frac{k_{Ty} \cdot S}{c \cdot m} \cdot \tau_{y_0} + \frac{P_y}{c \cdot m}; \quad Z_y := \mathrm{rkfixed}(\tau_y, 0, 100 \cdot 60, 100, D_y);$$

$t_y := Z_y^{<0>}; \quad \tau_y := Z_y^{<1>}; \quad \tau_{y_{80}} = 91.408.$

Зависимости превышения температуры от времени для трех рассмотренных случаев приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что установившееся превышение температуры определяется тем, считаем ли мы коэффициент теплоотдачи зависящим или не зависящим от температуры, а в последнем случае — от того, k_T при какой температуре мы используем при расчетах. Если в формулу для расчета превышения температуры подставить k_T при установившемся его значении, то ошибка в расчете получается минимальной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ВКЛЮЧЕНИЕ ДРОССЕЛЯ НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ DRDCON.mcd)

По 2-му закону Кирхгофа для контура, представленного на рис. 4.1:

$ur + uL - U = 0,$ (1)

где напряжение на активном сопротивлении обмотки дросселя

$ur = i \cdot r;$ (2)

напряжение на ее индуктивном сопротивлении

$uL = w \cdot d\Phi/dt;$ (3)

w — число витков обмотки; Φ — магнитный поток, Вб; t — время, с; U — напряжение, обеспечиваемое внешним источником, В; i — ток, А; r — сопротивление обмотки, Ом.

После приведения (1) к канонической форме получим

$$d\Phi/dt = U/w - i(\Phi)\cdot r/w, \quad (4)$$

где $i(\Phi)$ — зависимость тока в обмотке от магнитного потока, построенная по кривой намагничивания материала магнитопровода. Гистерезис и вихревые токи не учитываются. Магнитопровод дросселя замкнут — немагнитные зазоры отсутствуют.

Исходные данные

Примерно соответствуют параметрам электромагнита, рассчитанного в QB-программе DC [3]:

$$r := 700; \quad U := 220; \quad w := 12000; \quad l := 0.27; \quad S := 7\cdot 10^{-4}.$$

Здесь l — средняя длина в м, S — площадь поперечного сечения магнитопровода в м^2.

....

Здесь опущена часть, повторяющая строки рабочего документа B(H) (Приложение 1), расположенные в нем между горизонтальными точечными линиями.

....

Поток и ток можно рассчитать по формулам:
для участка сплайн-интерполяции:

$$\Phi sl_{k1} := Bsl_{k1}\cdot S; \quad isl_{k1} := Hsl_{k1}\cdot\frac{1}{w}; \quad ls := lspline(\Phi sl, isl);$$

для участка линейной интерполяции:

$$\Phi l_{k2} := Bl_{k2}\cdot S; \quad il_{k2} := Hl_{k2}\cdot\frac{1}{w}.$$

Проверка числовых значений для узловых точек:

$$q - sp = 4; \quad sp = 6; \quad q = 10; \quad Bl_{q+1-sp} = 2.5; \quad Hl_{q+1-sp} = 2.592\cdot 10^5; \quad q+1 = 11;$$

$$q+1-sp = 5; \quad \Phi l_{q+1-sp}\cdot 1000 = 1.75; \quad il_{q+1-sp} = 5.831.$$

Максимальный поток:

$$\Phi_{max} := 1.1\cdot \Phi l_{q+1-sp};$$

$$i(\Phi) := \left| \begin{array}{l} interp(ls, \Phi sl, isl, \Phi) \text{ if } \Phi \leqslant \Phi sl_{sp} \\ linterp(\Phi l, il, \Phi) \text{ if } \Phi > \Phi sl_{sp} \end{array} \right.$$

Дискретная переменная (назначает диапазон и шаг изменения магнитного потока):

$$\Phi := 0, \frac{\Phi_{max}}{1000} .. \Phi_{max}.$$

Расчет значения максимального потока: $\Phi_{max}\cdot 1000 = 1.925$.

Кривые изменения тока от магнитного потока показаны на рис. 1 и 2. Кружки соответствуют опорным точкам кривой намагничивания материала сердечника дрос-

селя, для которых осуществлялась сплайн-интерполяция, крестики — точкам диапазона линейной интерполяции.

Установившийся ток (в А)

$$i_y := \frac{U}{r}; \quad i_y = 0.314.$$

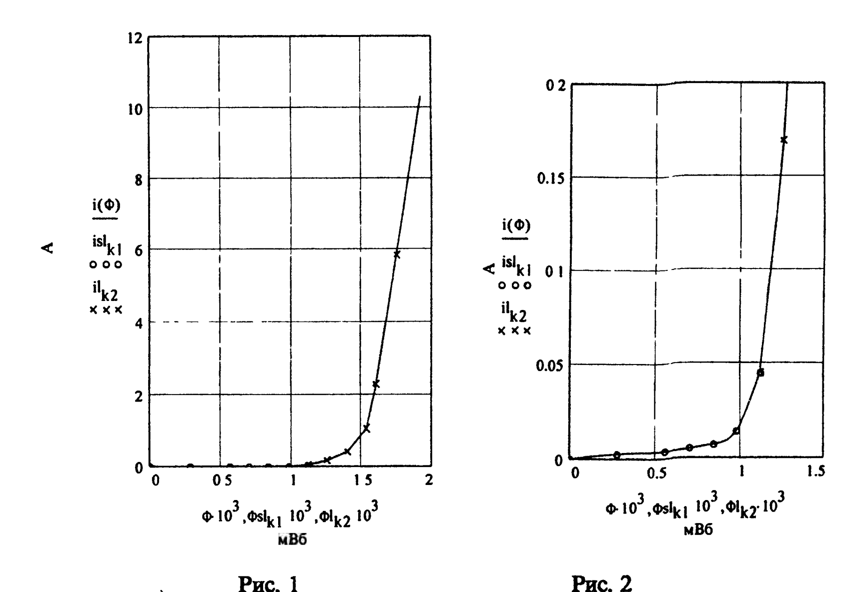


Рис. 1 Рис. 2

Функция D(t,Φ) независимой t и зависимой Φ переменных равна правой части уравнения (4), в которую подставляется Φ_0 — начальное значение зависимой переменной

$$\Phi_0 := 0.$$

$$D(t,\Phi) := \frac{U}{w} - \frac{i(\Phi_0)}{w} \cdot r.$$

Матрица значений независимой переменной t (ее левый вектор-столбец с номером 0) и зависимой переменной Φ (ее правый столбец с номером 1) определяется функцией Рунге — Кутта с шагом, адаптирующимся к особенностям исходного дифференциального уравнения, на участке от 0 до 0.2 с в 2000 точках:

$$Z := \mathrm{Rkadapt}(\Phi, 0, 0.2, 2000, D); \quad t := Z^{\langle 0 \rangle}; \quad \Phi := Z^{\langle 1 \rangle}; \quad n := 0..2000.$$

Магнитный поток в конце выбранного промежутка времени (в мВб)

$$\Phi_{2000} \cdot 1000 = 1.346.$$

Ток в обмотке: $i(\Phi_{2000}) = 0.314$.

Магнитная индукция

$$B:=\frac{\Phi}{S}. \qquad (5)$$

Напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки по (1) — (3)

$$ur_n:=i(\Phi_n)\cdot r; \quad uL_n:=U-i(\Phi_n)\cdot r.$$

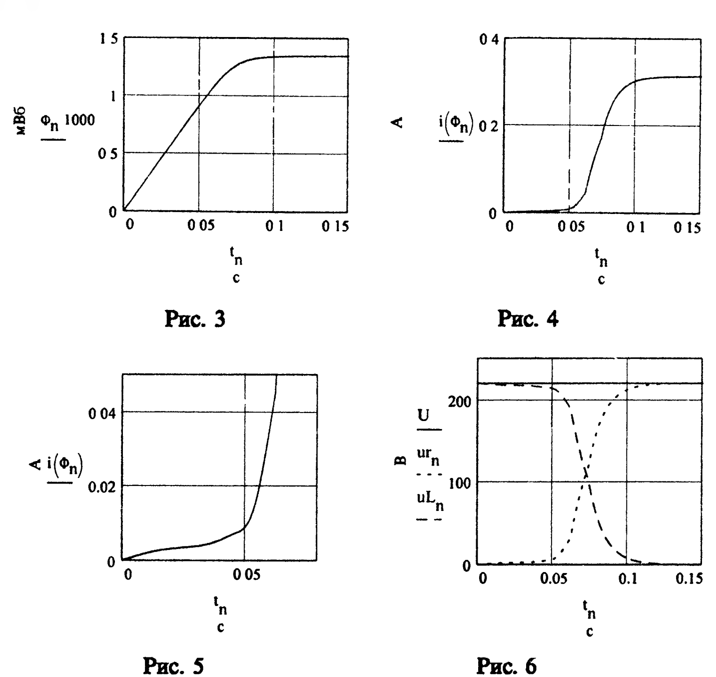


Рис. 3 Рис. 4

Рис. 5 Рис. 6

Значения функции $i(\Phi)$ в точках, назначенных дискретной переменной **n**, объединим в векторе $i\Phi$:

$$i\Phi_n:=i(\Phi_n).$$

Формулу (3) легко привести к виду $uL=L\cdot di/dt$, где индуктивность обмотки дросселя в Гн

$$L=w\cdot d\Phi/di. \qquad (6)$$

Для построения кривой ее зависимости от времени введем сначала функцию $\Phi(i)$ аналогично тому, как это было сделано выше для функции $i(\Phi)$

$$lsd:=lspline(isl,\Phi sl); \quad i_{max}:=1.1\cdot il_{q+1-sp}; \quad i:=0,\frac{i_{max}}{50000}..0.002\cdot i_{max}.$$

$$\Phi(i):=\left|\begin{array}{l} interp(lsd,isl,\Phi sl,i) \text{ if } i\leq isl_{sp} \\ linterp(il,\Phi l,i) \text{ if } i>isl_{sp} \end{array}\right.$$

Индуктивность по (6): $L(i) := w \cdot \frac{d}{di}\Phi(i)$.

Установившийся поток (в мВб)

$\Phi(i_y) \cdot 1000 = 1.346.$

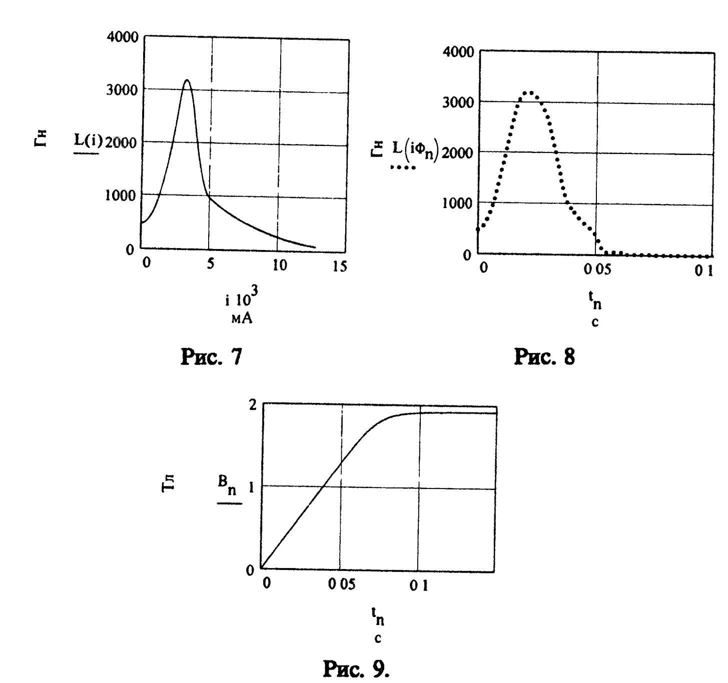


Рис. 7 **Рис. 8**

Рис. 9.

На рис. 3 — 6, 8 и 9 приведены зависимости от времени: потока (рис. 3), тока (рис. 4 и 5), напряжений (рис. 6), индуктивности (рис. 8) и магнитной индукции (рис. 9). На рис. 7 изображена зависимость индуктивности от тока.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

ОТКЛЮЧЕНИЕ ДРОССЕЛЯ ОТ ИСТОЧНИКА С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЗАМЫКАНИЕМ ЕГО КОНЦОВ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ DROFF.mcd)

По 2-му закону Кирхгофа для контура, изображенного на рис. 4.2, *а*,

$$ur + uL + uext = 0; \quad (1)$$

для контура на рис. 4.2, *б*

$$uR + uL = 0, \quad (2)$$

где напряжение на активном сопротивлении провода обмотки дросселя

$$ur = i \cdot r; \quad (3)$$

напряжение на ее индуктивном сопротивлении

$$uL = w \cdot d\Phi/dt; \tag{4}$$

напряжение на активном сопротивлении

$$R = r + rext \tag{5}$$

цепи обмотки дросселя

$$uR = i \cdot R; \tag{6}$$

напряжение на внешнем активном сопротивлении rext, подключаемом к обмотке одновременно с отключением источника питания,

$$uext = i \cdot rext. \tag{7}$$

Здесь **w** — число витков обмотки; Ф — магнитный поток, Вб; **t** — время, с; **i** — ток, А; **R** — активное сопротивление цепи обмотки, Ом; **r** — активное сопротивление провода обмотки; **rext** — активное сопротивление, подключаемое к обмотке в момент ее отключения от источника питания.

После приведения к канонической форме получим

$$d\Phi/dt = -i(\Phi) \cdot R/w, \tag{8}$$

где **i(Ф)** — зависимость тока в обмотке от магнитного потока, построенная по кривой намагничивания материала магнитопровода. Гистерезис и вихревые токи не учитываются. Магнитопровод дросселя замкнут — немагнитные зазоры отсутствуют.

Исходные данные (примерно соответствуют параметрам электромагнита, рассчитанного в программе DC [3]):

$$r := 700; \quad rext := 10^5; \quad w := 12000; \quad R := r + rext; \quad l := 0.27; \quad S := 7 \cdot 10^{-4}.$$

Здесь **l** — средняя длина в м, **S** — площадь поперечного сечения магнитопровода в м^2.

....

Здесь опущена часть, повторяющая строки рабочего документа B(H) (Приложение 1), расположенные в нем между горизонтальными точечными линиями.

....

Поток и ток можно рассчитать по формулам:
для участка сплайн-интерполяции:

$$\Phi sl_{k1} := Bsl_{k1} \cdot S; \quad isl_{k1} := Hsl_{k1} \cdot \frac{1}{w}; \quad ls := lspline(\Phi sl, isl);$$

для участка линейной интерполяции:

$$\Phi l_{k2} := Bl_{k2} \cdot S; \quad il_{k2} := Hl_{k2} \cdot \frac{1}{w}.$$

Проверка числовых значений для узловых точек:

$$Bl_{q+1-sp} = 2.5; \quad Hl_{q+1-sp} = 2.592 \cdot 10^5; \quad q = 10; \quad sp = 6;$$

$$\Phi l_{q+1-sp} \cdot 1000 = 1.75; \quad il_{q+1-sp} = 5.831; \quad q + 1 = 11; \quad q + 1 - sp = 5.$$

При кубической сплайн-интерполяции будем пользоваться функцией **lspline**, которая генерирует кривую сплайна, приближающуюся к прямой линии в граничных точках. Использование для этих целей функций **pspline** (в граничных точках кривая

сплайна приближается к параболе) и cspline (в граничных точках кривая приближается к кубическому полиному) дали худшие результаты.

$$i(\Phi) := \left| \begin{array}{l} \text{interp}(ls,\Phi sl,isl,\Phi) \text{ if } \Phi \leqslant \Phi sl_{sp} \\ \text{linterp}(\Phi l,il,\Phi) \text{ if } \Phi > \Phi sl_{sp}; \end{array} \right.$$

$$\Phi_{max} := 1.1 \cdot \Phi l_{q+1-sp}; \quad \Phi := 0, \frac{\Phi_{max}}{1000} .. \Phi_{max}; \quad \Phi_{max} \cdot 1000 = 1.925; \quad i(1.775 \cdot 10^{-3}) = 6.47.$$

На рис. 1 и 2 показаны зависимости тока в обмотке дросселя от магнитного потока в его магнитопроводе.

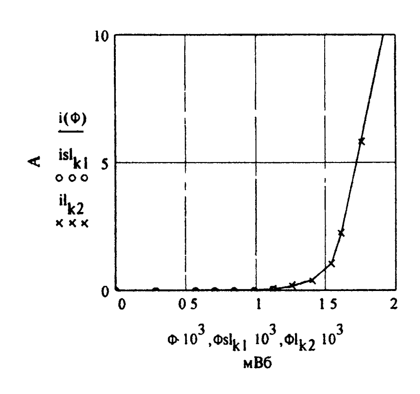


Рис. 1

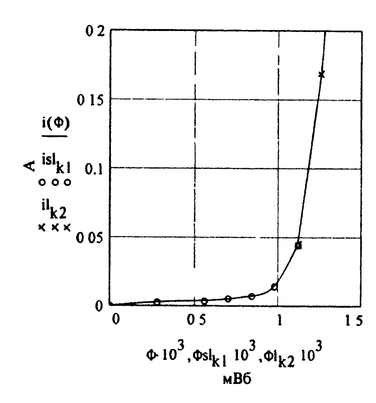


Рис. 2

Функция D(t,Φ) независимой t и зависимой Φ переменных равна правой части уравнения (8), в которую подставляется Φ_0 — начальное значение зависимой переменной. Последнее принимается равным потоку, установившемуся в магнитопроводе дросселя при предварительном подключении его обмотки на постоянное напряжение U = 220 В (см. документ DRDCON — Приложение 8):

$$\Phi_0 := 1.346 \cdot 10^{-3}.$$

При этом ток:

$$i(\Phi_0) = 0.314;$$

$$D(t,\Phi) := -\left(\frac{i(\Phi_0)}{w} \cdot R\right).$$

Матрица значений независимой переменной t (ее левый вектор-столбец с номером 0) и зависимой переменной Φ (ее правый столбец с номером 1) определяется функцией Рунге — Кутта с шагом, адаптирующимся к особенностям исходного дифференциального уравнения, на участке от 0 до 0.05 с в 1000 точках:

$$Z := \text{Rkadapt}(\Phi,0,0.05,1000,D); \quad n := 0..1000; \quad t := Z^{<0>}; \quad \Phi := Z^{<1>}.$$

На рис. 3 показано изменение во времени магнитного потока, а на рис. 4 — тока.

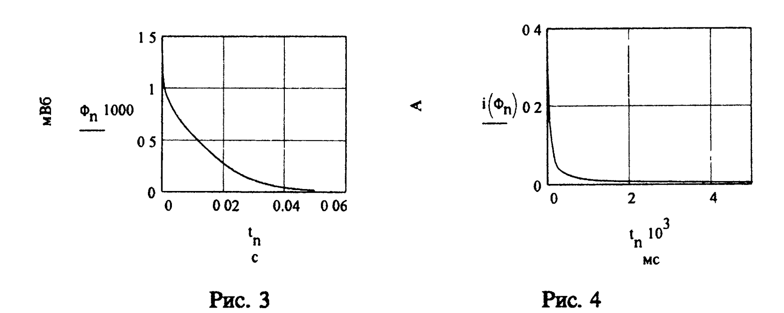


Рис. 3 Рис. 4

Напряжение на индуктивном сопротивлении обмотки по (2) (штриховая кривая на рис. 5):

$uL_n := -i(\Phi_n) \cdot R.$

Напряжение на активном сопротивлении обмотки по (3) (кривая из жирных точек на рис. 5 и 6):

$ur_n = i(\Phi_n) \cdot r.$

Напряжение на внешнем активном сопротивлении по (7) (сплошная кривая на рис. 5):

$uext_n := i(\Phi_n) \cdot rext; \quad uext_0 = 3.139 \cdot 10^4; \quad uext_1 = 1.612 \cdot 10^4.$

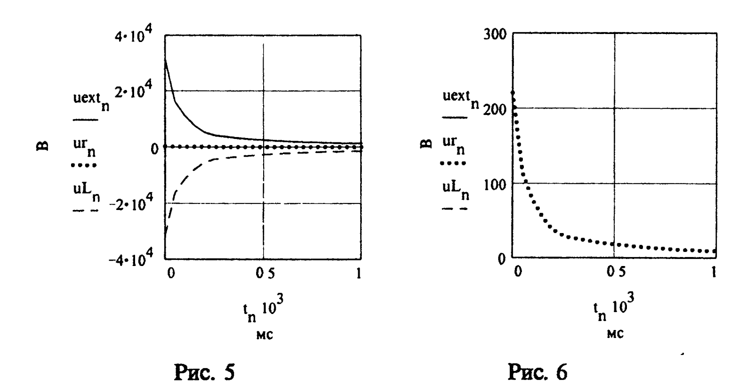


Рис. 5 Рис. 6

При выбранном масштабе по оси ординат кривые **uext** и **uL** на рис. 6 не видны.

Сплошная кривая на рис. 5 показывает, что при принятых в текущем документе исходных данных напряжение **uext** на зажимах дросселя при его отключении от источника неизменного во времени напряжения превышает последнее более чем на два порядка. Режим, рассчитанный в документе DROFF, фактически моделирует отключение дросселя от источника напряжения путем простого размыкания его цепи. Перенапряжение, возникающее при этом, столь велико (около 40 кВ на рис. 5), что приводит обычно к пробою контактного промежутка и возникновению электрической дуги.

Аналогично тому, как это было сделано в документе DRDCON (Приложение 7), рассчитаем значение индуктивности обмотки дросселя, а на рис. 7 построим ее зависимость от времени.

$i\Phi_n := i(\Phi_n)$; $lsd := lspline(isl, \Phi sl)$;

$$\Phi(i) := \begin{vmatrix} interp(lsd, isl, \Phi sl, i) \text{ if } i \leqslant isl_{sp} \\ linterp(il, \Phi l, i) \text{ if } i > isl_{sp}. \end{vmatrix}$$

Индуктивность

$$L(i) := w \cdot \frac{d}{di} \Phi(i).$$

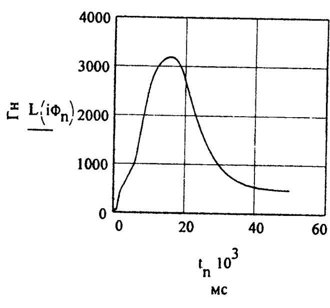


Рис. 7

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

ФОРМА КРИВОЙ ТОКА ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ПОТОКЕ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ DRLOOP.mcd)

Рассматривается дроссель с обмоткой напряжения без немагнитных зазоров. Учитывается динамическая петля гистерезиса материала магнитопровода. Получены зависимости тока от потока с учетом направления последнего (динамическая петля гистерезиса дросселя), а также зависимости тока, потока и напряжения от времени. Так как активное сопротивление обмотки не учитывается, напряжение источника питания равно по модулю и противоположно по фазе ЭДС самоиндукции.

Исходные данные

Магнитопровод дросселя имеет форму тороида. Его средняя длина в м (в направлении потока)

$l := 0.1577$;

поперечное сечение в м^2 (в направлении, перпендикулярном потоку)

$S := 0.000228$;

число витков намагничивающей обмотки

$w := 2853$;

циклическая частота в Гц

$f := 50$;

угловая частота в с$^{-1}$

$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$.

Материал магнитопровода — сталь 1212 толщиной 0.5 мм. Верхняя половина (для положительных значений напряженностей магнитного поля H) динамической петли гистерезиса H(B) построена на рис. 1 в этом документе. Координаты восходящей ветви этой петли вводятся в векторы **Bu** (магнитной индукции) и **Hu** (напряженности магнитного поля), нисходящей — в векторы **Bd** (магнитной индукции) и **Hd** (напряженности магнитного поля).

....

Здесь опущена часть, повторяющая строки рабочего документа H(B)LOOP (Приложение 3), расположенные в нем между горизонтальными точечными линиями.

....

Поток в Вб и ток в А при намагничивании в u-й узловой точке:

$$\Phi u_u := Bu_u \cdot S; \quad iu_u := Hu_u \cdot \frac{1}{w}.$$

Поток и ток при размагничивании в d-й узловой точке:

$$\Phi d_d := Bd_d \cdot S; \quad id_d := Hd_d \cdot \frac{1}{w}.$$

Определим значения потоков и токов в узловых точках:

Φu =

	0
0	$-2.006\cdot 10^{-4}$
1	$-1.368\cdot 10^{-4}$
2	$-6.84\cdot 10^{-5}$
3	0
4	$6.84\cdot 10^{-5}$
5	$1.368\cdot 10^{-4}$
6	$2.052\cdot 10^{-4}$
7	$2.326\cdot 10^{-4}$
8	$2.736\cdot 10^{-4}$

iu =

	0
0	0
1	0.004
2	0.006
3	0.007
4	0.009
5	0.011
6	0.015
7	0.018
8	0.028
9	0.039
10	0.066
11	0.111

$$\Phi d = \begin{bmatrix} 2.006\cdot 10^{-4} \\ 2.508\cdot 10^{-4} \\ 2.736\cdot 10^{-4} \\ 2.873\cdot 10^{-4} \\ 3.146\cdot 10^{-4} \\ 3.306\cdot 10^{-4} \\ 3.42\cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \qquad id = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.009 \\ 0.014 \\ 0.018 \\ 0.039 \\ 0.066 \\ 0.111 \end{bmatrix}$$

Поток, соответствующий остаточной магнитной индукции:

$$\Phi r := Br \cdot S; \quad \Phi r = 2.006 \cdot 10^{-4}.$$

Поток, соответствующий максимальной магнитной индукции:

$$\Phi m := Bm \cdot S; \quad \Phi m = 3.42 \cdot 10^{-4}.$$

Ток, соответствующий максимальной напряженности магнитного поля:

$$im := Hm \cdot \frac{1}{w}; \quad im = 0.111.$$

Введем функции, интерполирующие восходящую ($i_u(\phi)$) и нисходящую ($i_d(\phi)$) ветви петли гистерезиса:

su: = lspline(Φu,iu); sd: = lspline(Φd,id);

$$i_u(\phi) := \begin{cases} -\text{interp}(sd,\Phi d,id,-\phi) \text{ if } -\Phi m \leqslant \phi < -\Phi r \\ \text{interp}(su,\Phi u,iu,\phi) \text{ if } -\Phi r \leqslant \phi \leqslant \Phi m \\ im + (\phi - \Phi m) \cdot \dfrac{1}{\mu_0 \cdot S \cdot w} \text{ if } \phi > \Phi m \\ -im + (\phi + \Phi m) \cdot \dfrac{1}{\mu_0 \cdot S \cdot w} \text{ if } \phi < -\Phi m; \end{cases}$$

$$i_d(\phi):=\begin{cases} -\text{interp}(su,\Phi u,iu,-\phi) \text{ if } -\Phi m\leqslant\phi<\Phi r \\ \text{interp}(sd,\Phi d,id,\phi) \text{ if } \Phi r\leqslant\phi\leqslant\Phi m \\ im+(\phi-\Phi m)\cdot\dfrac{1}{\mu_0\cdot S\cdot w} \text{ if } \phi>\Phi m \\ -im+(\phi+\Phi m)\cdot\dfrac{1}{\mu_0\cdot S\cdot w} \text{ if } \phi<-\Phi m. \end{cases}$$

Дискретная переменная изменения потока

$\phi:=-399\cdot10^{-6},-389\cdot10^{-6}..399\cdot10^{-6}$.

На рис. 2 построена динамическая петля гистерезиса дросселя.

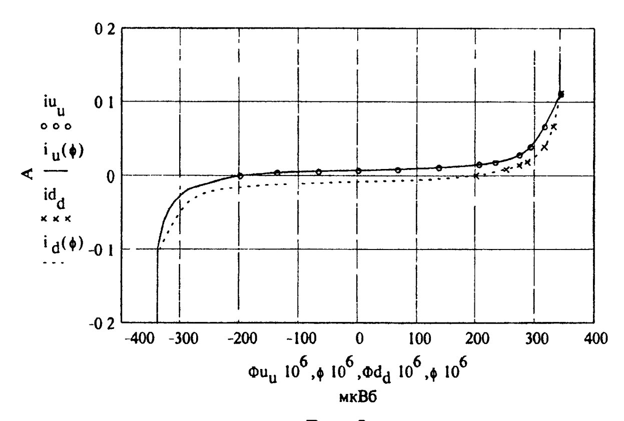


Рис. 2

Для контроля правильности работы введенных функций рассчитаем их значения в некоторых опорных и промежуточных точках:

$i_u(0.0002)=0.015$; $i_u(0.0003)=0.047$; $i_u(0.0001)=0.01$;

$i_u(-0.0002)=4.268\cdot10^{-5}$; $i_u(-0.0003)=-0.025$; $i_u(-0.0001)=0.005$;

$i_u(0.0004)=11.3$; $i_u(-0.0004)=-11.3$; $i_u(0.0005)=30.592$;

$i_u(-0.0005)=-30.592$; $i_d(0.0002)=-4.268\cdot10^{-5}$; $i_d(0.0001)=-0.005$.

Дискретная переменная для изображения процессов изменения во времени потока, тока и напряжения питания:

$n:=0..399$.

Время, в течение которого изображается процесс на рис. 3:

$t_n:=n\cdot10^{-4}$.

Принято синусоидальное изменение потока во времени:

$\phi_n:=\Phi m\cdot\sin(\omega\cdot t_n)$.

Обозначим амплитуду напряжения источника питания через

$U_{Em} := w \cdot \omega \cdot \Phi m$,

тогда мгновенное напряжение источника питания

$u_{E_n} := U_{Em} \cdot \cos(\omega \cdot t_n)$.

По знаку этого напряжения можно судить о направлении изменения потока (при $u_E > 0$ поток увеличивается — происходит намагничивание по восходящей ветви петли гистерезиса; при $u_E < 0$ поток уменьшается — магнитопровод размагничивается по нисходящей ветви петли гистерезиса).

Введем функцию, которая позволяет рассчитывать мгновенный ток в обмотке в зависимости от мгновенного потока с учетом направления последнего. Эта функция учитывает не только нелинейность магнитного материала, но и его гистерезис.

$$i(\phi, u_E) := \begin{vmatrix} i_u(\phi) \text{ if } u_E \geq 0 \\ i_d(\phi) \text{ if } u_E < 0. \end{vmatrix}$$

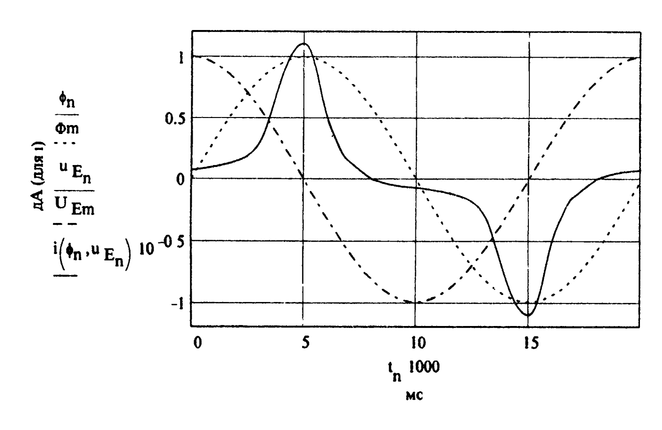


Рис. 3

Расчет значений $\mathbf{i(\phi, u_E)}$ в некоторых промежуточных точках:

$i(3 \cdot 10^{-4}, -0.5) = 0.025$; $i(3 \cdot 10^{-4}, 0.8) = 0.047$; $i(-3 \cdot 10^{-4}, 0.2) = -0.025$;

$i(3 \cdot 10^{-4}, -0.2) = 0.025$; $i(3 \cdot 10^{-4}, -0.8) = 0.025$; $i(3 \cdot 10^{-4}, 0.5) = 0.047$.

На рис. 3 показаны кривые изменения во времени потока, напряжения и тока $\left(\frac{\Phi_n}{\Phi m}\right.$ — мгновенный поток, отнесенный к его амплитуде; $\frac{u_{E_n}}{U_{Em}}$ — мгновенное напряжение источника питания, отнесенное к его амплитуде).

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ VTSON.mcd)

Исходные дифференциальные уравнения

По 2-му закону Кирхгофа для контуров первичной и вторичной обмоток при согласном направлении токов (см. рис. 4.5, *а*) можно написать:

$$\mathbf{ur1 + ux1 - U = 0;} \tag{1}$$

$$\mathbf{ur2 + ux2 = 0.} \tag{2}$$

Здесь напряжение на активном сопротивлении **r1** провода первичной обмотки

$$\mathbf{ur1 = i1 \cdot r1;} \tag{3}$$

напряжение на реактивном сопротивлении **x1** первичной обмотки

$$\mathbf{ux1 = uL1 + uM1;} \tag{4}$$

напряжение на составляющей **x1**, обусловленной собственной индуктивностью **L1** первичной обмотки,

$$\mathbf{uL1 = L1 \cdot di1/dt;} \tag{5}$$

составляющая напряжения **ux1**, обусловленная ЭДС, наводимой в первичной обмотке изменением во времени тока вторичной через поток взаимной индукции,

$$\mathbf{uM1 = M \cdot di2/dt;} \tag{6}$$

U — напряжение, приложенное к первичной обмотке; **t** — время; напряжение на активном сопротивлении **r2** цепи вторичной обмотки

$$\mathbf{ur2 = i2 \cdot r2;} \tag{7}$$

напряжение на реактивном сопротивлении **x2** вторичной обмотки

$$\mathbf{ux2 = uL2 + uM2;} \tag{8}$$

напряжение на составляющей **x2**, обусловленной собственной индуктивностью **L2** вторичной обмотки,

$$\mathbf{uL2 = L2 \cdot di2/dt;} \tag{9}$$

составляющая напряжения **ux2**, обусловленная ЭДС, наводимой во вторичной обмотке изменением во времени тока первичной через поток взаимной индукции,

$$\mathbf{uM2 = M \cdot di1/dt.} \tag{10}$$

Все напряжения — в В, токи — в А, сопротивления — в Ом, время — в с; **L1, L2, M** — в Гн.

После подстановки (3), (4), (7) и (8) в (1) и (2) с использованием (5), (6), (9) и (10) получим

$$\mathbf{U = r1 \cdot i1 + L1 \cdot di1/dt + M \cdot di2/dt;} \tag{11}$$

$$\mathbf{0 = r2 \cdot i2 + L2 \cdot di2/dt + M \cdot di1/dt.} \tag{12}$$

Исходные уравнения, приведенные к нормальной форме:

$di1/dt=(U\cdot L2+M\cdot r2\cdot i2-L2\cdot r1\cdot i1)/(L1\cdot L2-M^2);$ (13)

$di2/dt=(M\cdot r1\cdot i1-L1\cdot r2\cdot i2-M\cdot U)/(L1\cdot L2-M^2).$ (14)

Начальные условия: $i1(0)=0$; $i2(0)=0$.

Исходные данные

(соответствуют примеру на с. 94 [9])

U:=1; L1:=0.0577; L2:=0.1; r1:=0.99821; r2:=1.

Коэффициент связи $(k=M/(L1\cdot L2)^{1/2})$ k:=0.632.

Взаимоиндуктивность $M:=k\cdot\sqrt{L1\cdot L2}$. Расчет дает M=0.048.

Вектор начальных условий

$y:=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix}$. Это означает, что $i1(0)=y_0=0$; $i2(0)=y_1=0$.

$$D(t,y)=\left|\begin{array}{l}\dfrac{U\cdot L2+M\cdot r2\cdot y_1-L2\cdot r1\cdot y_0}{L1\cdot L2\cdot M^2}\\ \dfrac{-M\cdot U+M\cdot r1\cdot y_0-L1\cdot r2\cdot y_1}{L1\cdot L2-M^2}\end{array}\right.$$

n:=0..1000; Z:=rkfixed(y,0,0.39,1000,D); $t:=Z^{<0>}$; $i1:=Z^{<1>}$; $i2:=Z^{<2>}$.

Все величины далее будут показаны в функции времени. На рис. 1 изображено изменение токов в обмотках.

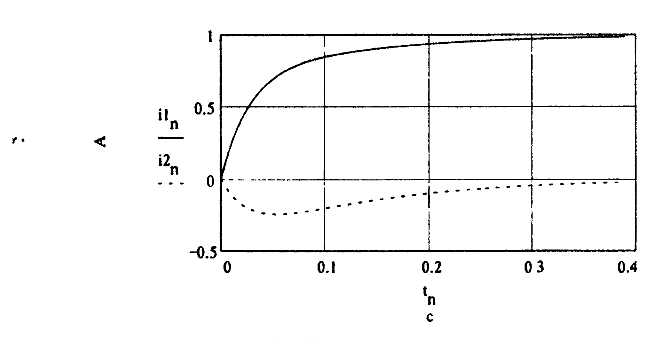


Рис. 1

Расчеты напряжений на элементах цепей обмоток

Напряжение на активном сопротивлении r1 первичной обмотки по (3):

$ur1:=i1\cdot r1$; $ur1_0=0$; $ur1_1=0.011$.

Напряжение ux1 на реактивном сопротивлении первичной обмотки по (1) и (3):

$ux1 := U - i1 \cdot r1; \quad ux1_0 = 1; \quad ux1_1 = 0.989; \quad ux1_{100} = 0.382.$

Напряжение на активном сопротивлении цепи вторичной обмотки по (7)

$ur2 := i2 \cdot r2.$

Напряжение **ux2** на реактивном сопротивлении цепи вторичной обмотки по (2) и (7):

$ux2 := -i2 \cdot r2.$

Напряжения на элементах первичной цепи показаны на рис. 2, вторичной — на рис. 3.

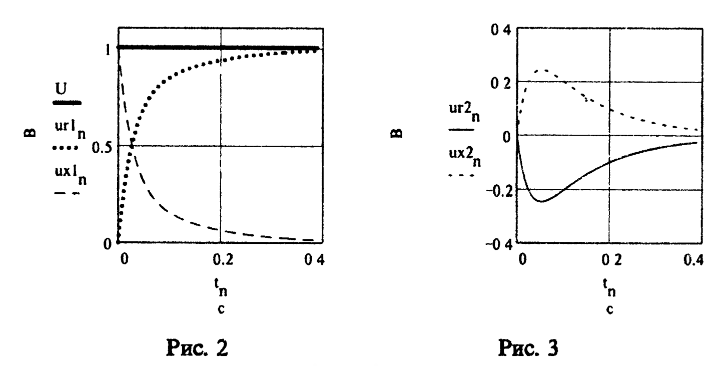


Рис. 2 Рис. 3

Расчеты составляющих напряжения на реактивных сопротивлениях обмоток

Сплайн-интерполяция векторов токов **i1** и **i2** (осуществляется для получения функций тока **fsi1(ft)** и **fsi2(ft)**, необходимых для их последующего дифференцирования по времени **ft**):

si1 := cspline(t,i1); si2 := cspline(t,i2); fsi1(ft) := interp(si1,t,i1,ft);

fsi2(ft) := interp(si2,t,i2,ft).

Напряжение **uL1** на индуктивном сопротивлении первичной обмотки, соответствующем ее собственной индуктивности **L1**, по (5):

$$uL1(ft) := L1 \cdot \frac{d}{dft} fsi1(ft).$$

Напряжение **uM1** на взаимоиндуктивном сопротивлении первичной обмотки, соответствующее ЭДС взаимной индукции, наводимой в ней током **i2** вторичной, по (6):

$$uM1(ft) := M \cdot \frac{d}{dft} fsi2(ft).$$

Напряжение **uL2** на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки, соответствующем ее собственной индуктивности **L2**, по (9):

$$uL2(ft) := L2 \cdot \frac{d}{dft} fsi2(ft).$$

Напряжение uM2 на взаимоиндуктивном сопротивлении вторичной обмотки, соответствующее ЭДС взаимной индукции, наводимой в ней током i1 первичной, по (10):

$$uM2(ft):=M\cdot\frac{d}{dft}fsi1(ft).$$

Дискретная переменная для изображения функций, представленных на рис. 4 и 5:

ft:=0,0.01..0.4.

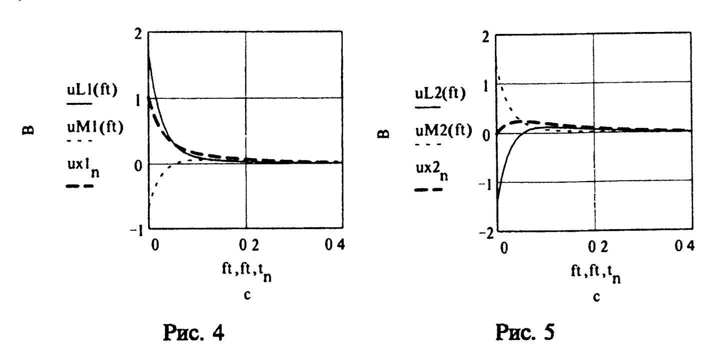


Рис. 4 Рис. 5

На рис. 4 показаны составляющие напряжения ux1 на суммарном реактивном сопротивлении первичной обмотки, на рис. 5 — составляющие напряжения ux2 на реактивном сопротивлении вторичной обмотки, а на рис. 6 — напряжения ux1 и ux2 вместе для их сопоставления.

Расчеты потокосцеплений

Потокосцепления первичной обмотки:
обусловленное собственным током (собственным потоком)

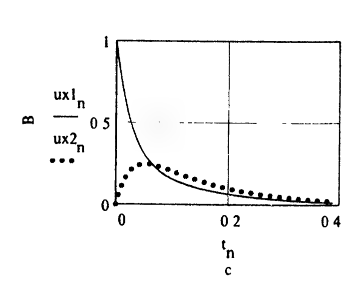
$\psi L1:=L1\cdot i1;$

обусловленное током вторичной обмотки через поток взаимной индукции

$\psi M1:=M\cdot i2;$

суммарное

$\psi 1:=\psi L1+\psi M1.$



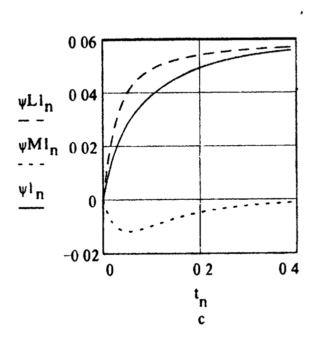


Рис. 6 Рис. 7

Потокосцепления вторичной обмотки:
обусловленное собственным током (собственным потоком)

$\psi L2 := L2 \cdot i2;$

обусловленное током первичной обмотки через поток взаимной индукции

$\psi M2 := M \cdot i1;$

суммарное

$\psi 2 := \psi L2 + \psi M2.$

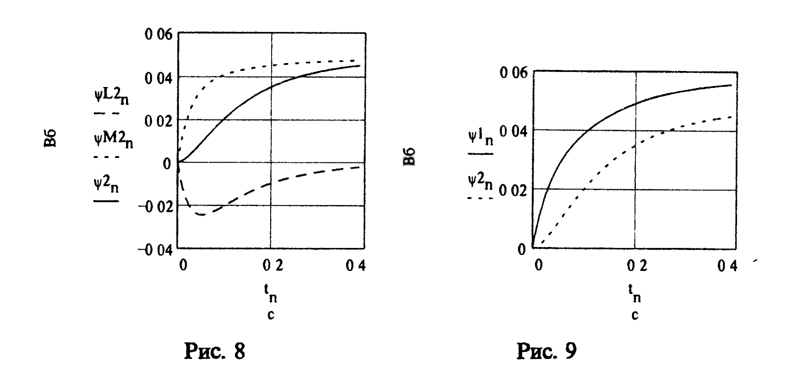


Рис. 8 Рис. 9

Зависимости потокосцеплений первичной обмотки от времени изображены на рис. 7, вторичной — на рис. 8, суммарных потокосцеплений обеих обмоток — на рис. 9.

Рис. 7 показывает, что в любой момент времени суммарное потокосцепление **ψ1** первичной обмотки меньше, чем то потокосцепление **ψL1**, которое она имела бы при отсутствии вторичной обмотки.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

ПРОЦЕСС ОТКЛЮЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА (ДОКУМЕНТ VTSOFF.mcd)

Исходные дифференциальные уравнения

Первичная обмотка с собственным активным сопротивлением **r1** одновременно с отключением от источника замыкается на внешнее активное сопротивление **rext**.

Начальные условия: **i1(0) = U/r1; i2(0) = 0**, где **U** — напряжение источника постоянного тока до его отключения (в момент отключения токи в обмотках принимаются равными их установившимся значениям).

По 2-му закону Кирхгофа для контуров первичной и вторичной обмоток при их согласном включении (см. рис. 4.5, *в* и *г*) можно написать:

$$uR1 + ux1 = 0; \quad (1)$$

$$ur2 + ux2 = 0. \quad (2)$$

Здесь напряжение на активном сопротивлении

$$R1 = r1 + rext \quad (3)$$

цепи первичной обмотки

$$uR1 = R1 \cdot i1; \quad (4)$$

напряжение на активном сопротивлении **r1** провода первичной обмотки

$$ur1 = r1 \cdot i1; \quad (5)$$

напряжение на внешнем активном сопротивлении **rext**, на которое закорачивается цепь первичной обмотки в момент ее отключения от источника,

$$uext = rext \cdot i1; \quad (6)$$

напряжение на реактивном сопротивлении **x1** первичной обмотки

$$ux1 = uL1 + uM1; \quad (7)$$

напряжение на составляющей **x1**, обусловленной собственной индуктивностью **L1** первичной обмотки,

$$uL1 = L1 \cdot di1/dt; \quad (8)$$

t — время;
составляющая напряжения **ux1**, обусловленная ЭДС, наводимой в первичной обмотке изменением во времени тока вторичной через поток взаимной индукции,

$$uM1 = M \cdot di2/dt; \quad (9)$$

напряжение на активном сопротивлении **r2** цепи вторичной обмотки

$$ur2 = r2 \cdot i2; \quad (10)$$

напряжение на реактивном сопротивлении **x2** вторичной обмотки

$$ux2 = uL2 + uM2; \quad (11)$$

напряжение на составляющей **x2**, обусловленной собственной индуктивностью **L2** вторичной обмотки,

$$uL2 = L2 \cdot di2/dt; \quad (12)$$

составляющая напряжения **ux2**, обусловленная ЭДС, наводимой во вторичной обмотке изменением во времени тока первичной через поток взаимной индукции,

$$uM2 = M \cdot di1/dt. \quad (13)$$

Все напряжения — в В, токи — в А, сопротивления — в Ом, время — в с; **L1, L2, M** — в Гн.

После подстановки (4), (7), (10), (11) в (1) и (2) с использованием (3), (5), (6), (8), (9), (12), (13) получим

$$0 = R1 \cdot i1 + L1 \cdot di1/dt + M \cdot di2/dt; \quad (14)$$

$$0 = r2 \cdot i2 + L2 \cdot di2/dt + M \cdot di1/dt. \quad (15)$$

Исходные уравнения, приведенные к нормальной форме:

$$di1/dt = (M \cdot r2 \cdot i2 - L2 \cdot R1 \cdot i1)/(L1\ \ L2 - M^2);$$

$$di2/dt = (M \cdot R1 \cdot i1 - L1 \cdot r2 \cdot i2)/(L1 \cdot L2 - M^2).$$

Исходные данные

(соответствуют примеру на с. 94 [9])

$L1:=0.0577;\quad L2:=0.1.$

Коэффициент связи ($k=M/(L1\cdot L2)^{1/2}$)

$k:=0.632.$

Взаимоиндуктивность

$M:=k\cdot\sqrt{L1\cdot L2}.$

Расчет дает:

$M=0.048.$

$rext:=200$
(большее значение **rext** приводит к перегрузке компьютера)

$r1:=0.99821;\quad r2:=1;\quad U:=1.$

Суммарное активное сопротивление цепи первичной обмотки после ее отключения от источника

$R1:=r1+rext.$

Расчет токов

Вектор начальных условий

$$y:=\begin{pmatrix}\dfrac{U}{r1}\\ 0\end{pmatrix}.$$

Это означает, что

$\mathbf{i1(0)=y_0=U/r1;\ i2(0)=y_1=0.}$

Установившийся ток в первичной обмотке до ее отключения от источника

$$\frac{U}{r1}=1.002.$$

$$D(t,y):=\begin{vmatrix}\dfrac{M\cdot r2\cdot y_1-L2\cdot R1\cdot y_0}{L1\cdot L2-M^2}\\ \dfrac{M\cdot R1\cdot y_0-L1\cdot r2\cdot y_1}{L1\cdot L2-M^2}\end{vmatrix}$$

$n:=0..2000;$

$Z:=Rkadapt(y,0,0.4,2000,D);$ (16)

$t:=Z^{<0>};\quad i1:=Z^{<1>};\quad i2:=Z^{<2>}.$

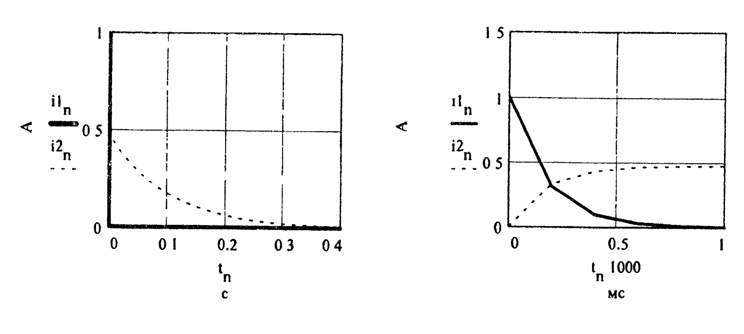


Рис. 1 Рис. 2

Все величины далее будут показаны на графиках в функции времени. Изменение токов в обмотках изображено на рис. 1 и 2.

Расчеты напряжений на элементах цепи первичной обмотки

Напряжение на внешнем сопротивлении первичной обмотки:

$uext := i1 \cdot rext$; $uext_0 = 200.359$; $uext_1 = 62.88$; $uext_{100} = 0.189$.

Напряжение на внутреннем активном сопротивлении первичной обмотки:

$ur1 := i1 \cdot r1$; $ur1_0 = 1$; $ur1_1 = 0.314$.

По (1) напряжение на реактивном сопротивлении первичной обмотки

$ux1 := -i1 \cdot R1$; $ux1_0 = -201.359$; $ux1_1 = -63.194$; $ux1_{100} = -0.19$.

MCAD соединяет точки, рассчитанные им для каждого значения дискретной переменной **n**, прямыми линиями. При расчете матрицы **Z** по функции **Rkadapt** в строке (16) принято, что на отрезок времени 0.4 с приходится 2000 точек (не считая исходной). Таким образом, точки находятся друг от друга на расстоянии, равном 400 мс/2000 = 0.2 мс. Так как вдоль оси абсцисс рис. 1 отложен промежуток времени 0.4 с, то кривая **i2** получается плавной. Вдоль оси абсцисс рис. 2, 3 и 4 отложены промежутки времени всего 1 мс, вдоль них — всего по 5 промежутков 0.2 мс, что соответствует шести точкам. Поэтому графики на рис. 2, 3 и 4 представляют собой ломаные линии.

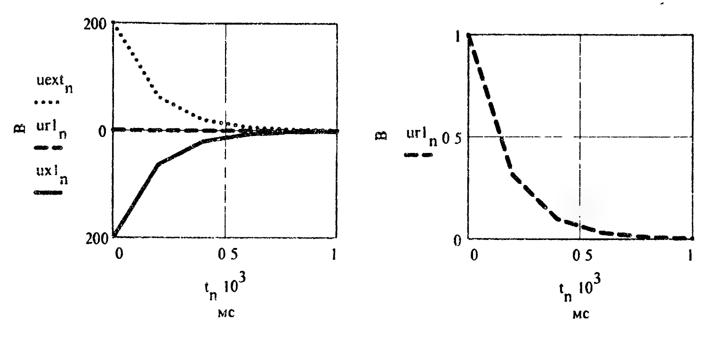


Рис. 3 Рис. 4

Расчеты составляющих напряжения на реактивных сопротивлениях обмоток

Сплайн-интерполяция векторов токов **i1** и **i2** (осуществляется для получения функций тока **fsi1(ft)** и **fsi2(ft)**, необходимых для их последующего дифференцирования по времени **ft**):

si1:=cspline(t,i1); si2:=cspline(t,i2); fsi1(ft):=interp(si1,t,i1,ft);

fsi2(ft):=interp(si2,t,i2,ft).

Напряжение **uL1** на индуктивном сопротивлении первичной обмотки, соответствующем ее собственной индуктивности **L1**, по (8):

$$uL1(ft):=L1\cdot\frac{d}{dft}fsi1(ft).$$

Напряжение **uM1** на взаимоиндуктивном сопротивлении первичной обмотки, соответствующее ЭДС взаимной индукции, наводимой в ней током **i2** вторичной, по (9):

$$uM1(ft):=M\cdot\frac{d}{dft}fsi2(ft).$$

Напряжение **uL2** на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки, соответствующем ее собственной индуктивности **L2**, по (12):

$$uL2(ft):=L2\cdot\frac{d}{dft}fsi2(ft).$$

Напряжение **uM2** на взаимоиндуктивном сопротивлении вторичной обмотки, соответствующее ЭДС взаимной индукции, наводимой в ней током **i1** первичной, по (13):

$$uM2(ft):=M\cdot\frac{d}{dft}fsi1(ft).$$

По (2) и (10) напряжение **ux2** на реактивном сопротивлении вторичной обмотки:

ux2:= −i2·r2.

Дискретная переменная для изображения введенных функций на рис. 5 и 6:

ft:=0,0.00001..0.001. (17)

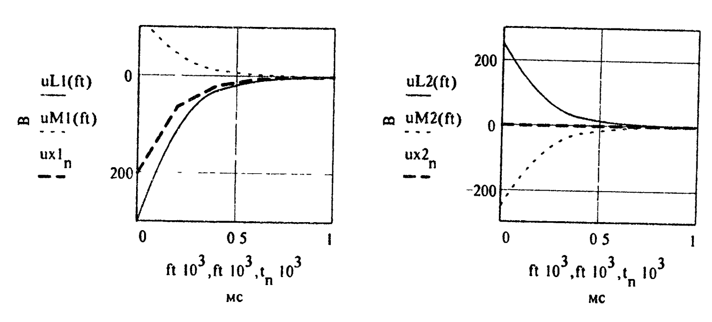


Рис. 5 Рис. 6

На рис. 5 показаны составляющие напряжения **ux1** на суммарном реактивном сопротивлении первичной обмотки, на рис. 6 — составляющие напряжения **ux2** на реактивном сопротивлении вторичной обмотки, а на рис. 7 и 8 — напряжения **ux1** и **ux2** — совместно на каждом из этих рисунков (для сопоставления этих напряжений).

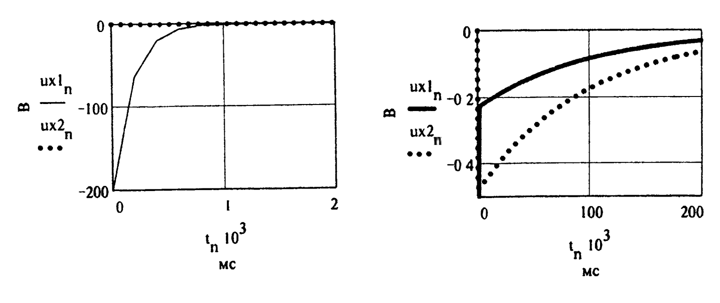


Рис. 7 Рис. 8

Расчеты потокосцеплений

Потокосцепления первичной обмотки:
обусловленное собственным током (собственным потоком)

$\psi L1 := L1 \cdot i1;$

обусловленное током вторичной обмотки через поток взаимной индукции

$\psi M1 := M \cdot i2;$

суммарное

$\psi 1 := \psi L1 + \psi M1.$

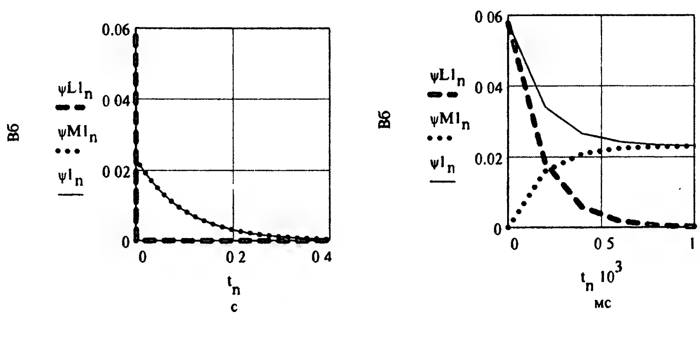


Рис. 9 Рис. 10

Потокосцепления вторичной обмотки:
обусловленное собственным током (собственным потоком)

$\psi L2 := L2 \cdot i2;$

обусловленное током первичной обмотки через поток взаимной индукции

$\psi M2 := M \cdot i1;$

суммарное

$\psi 2 := \psi L2 + \psi M2.$

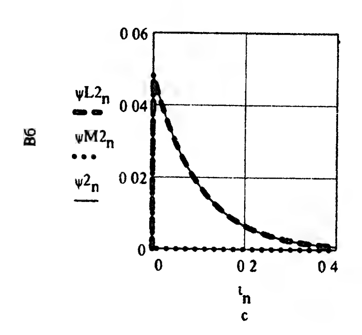


Рис. 11

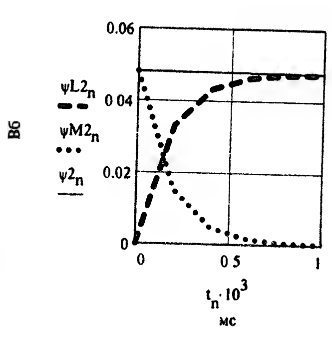


Рис. 12

Зависимости потокосцеплений первичной обмотки от времени изображены на рис. 9 и 10, вторичной — на рис. 11 и 12, суммарных потокосцеплений обеих обмоток — на рис. 13. Рис. 9 и 10 показывают, что потокосцепление $\psi L1$, обусловленное собственным током первичной обмотки, падает до нуля так же быстро (примерно за 1 мс на рис. 10), как и сам ток **i1** (см. рис. 2). За это время возрастает потокосцепление $\psi M1$, обусловленное током вторичной обмотки, которое потом медленно (за 0,4 с) вместе с суммарным потокосцеплением $\psi 1$ первичной обмотки уменьшается до нуля (на рис. 9 жирная точечная кривая $\psi M1$ и тонкая сплошная $\psi 1$ наложились друг на друга).

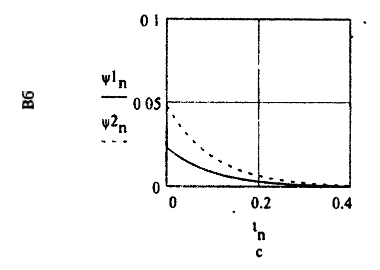


Рис. 13

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

ФРАГМЕНТ ГЛАВНОГО МОДУЛЯ СЕГМЕНТА DU2 ОВЕРЛЕЙНОЙ QB-ПРОГРАММЫ DU РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

```
CLS : LOCATE 10, 10
PRINT TAB(10); "  Если вам нужно вывести в файлы значения, необхо-"
PRINT TAB(10); "димые для расчета динамических характеристик в"
INPUT " MCAD-документе, нажмите 1, не хотите - 0.  ", ifd%
IF vbp% = 1 OR ifd% = 1 THEN
  CLS : LOCATE 10, 10
  PRINT TAB(10); "Введите число точек для построения кривых"   ' (1)
  PRINT TAB(10); "зависимости потокосцепления от тока. Можно вво-"
  PRINT TAB(10); "дить 52, 26, 13, 7. Координаты такого же числа"
  PRINT TAB(10); "точек будут выводиться и в файлы данных."
  PRINT TAB(10); " Время построения пяти кривых и вывода в файлы"
  PRINT TAB(10); "данных для них при вводе 26-и точек состав-"
  PRINT TAB(10); "ляет около 6-и минут с процессором Intel 286"
```

```
PRINT TAB(10); "и тактовой частотой 10 МГц,"
INPUT "              при 7-и точках - около 1.5 мин.  "; np     ' (2)
GOSUB ifelse  'переименование np и проверка правильности ввода np
'Расчет длины оси ординат, необходимый для построения кривых зави-
'симости потокосцепления от тока и определения координат их точек:
GdFw = Gd / 3  'суммарная приведенная по потокосцеплению
'проводимость рассеяния
kdFw1 = 1 + GdFw / G123(1)  'коэффициент рассеяния, приведенный по
'потокосцеплению (при минимальном зазоре)
Flw0 = Fl(0) * w * kdFw1  'максимально возможное потокосцепление,
'рассчитанное методом суммарного коэффициента рассеяния.
CLS : LOCATE 10, 10                  'Ввод длины оси ординат:   (3)
PRINT "Введите число, равное максимальному значению потокосцеп-"
PRINT ; TAB(10); "ления max.Flw в Вб. Оно будет отложено по оси "
PRINT ; TAB(10); "ординат, если вы будете строить график."
PRINT ; TAB(10); "Это число должно хорошо делиться на 4 и быть"
PRINT ; TAB(10); "несколько больше Flw0="; Flw0; "Вб."
INPUT "max.Flw= "; max.Flw                                '  (4)
CLS : LOCATE 10, 10             'Ввод длины оси абсцисс:        (5)
PRINT "Введите число, равное максимальному значению тока"
PRINT ; TAB(10); "max.I в А. Оно будет отложено по оси абсцисс,"
PRINT ; TAB(10); "если вы будете строить график. Все параметры,"
PRINT ; TAB(10); "которые будут выводиться в файлы для дальнейших"
PRINT ; TAB(10); "расчетов динамики включения электромагнита в"
PRINT ; TAB(10); "документе MCAD, будут определяться для токов,"
PRINT ; TAB(10); "меньших или равных max.I. Это число должно хо-"
PRINT ; TAB(10); "рошо делиться на 5 и быть больше тока обмотки,";
PRINT " равного"; F / w; "А.": INPUT "max.I="; max.I       '  (6)
'-------------------------------------------
IF ft <= 20 AND vbp% = 1 THEN
  CLS : LOCATE 10, 12
  PRINT "После нажатия любой клавиши на экране будут медленно"
  PRINT TAB(10); "строиться кривые зависимости потокосцепления"
  PRINT TAB(10); " от тока обмотки электромагнита."
  PRINT TAB(10); "На ЭВМ с процессором Intel 286 при тактовой"
  PRINT TAB(10); " частоте 10 МГц это длится несколько минут."
  PRINT TAB(10); "   Для продолжения работы с программой нажимай-"
  PRINT TAB(10); "те любую клавишу по завершении их построения."
  PRINT TAB(10); "  В любой момент можно прекратить построение"
  PRINT TAB(10); "и работу с программой, одновременно нажав"
  PRINT TAB(10); "клавиши [Ctrl]+[Break].": i$ = INPUT$(1): CLS
END IF
IF ft < 20 AND ifd% = 1 AND (vbp% = 2 OR vbp% = 3) THEN
  CLS : LOCATE 10, 10: PRINT "Пожалуйста, подождите:"
  LOCATE 11, 10
  PRINT "результаты расчетов выводятся в файлы данных."
  PRINT TAB(10); "На ЭВМ с процессором Intel 286 с тактовой"
  PRINT TAB(10); "частотой 10 МГц это занимает несколько минут."
END IF

' 2.6. Построение кривых зависимости потокосцепления от тока
'    (при vbp%=1) и вывод в файлы токов, потокосцеплений и
'          электромагнитных сил (при ifd%=1)

IF vbp% = 1 THEN
  SCREEN 1: COLOR 8, 1
  '             Нанесение надписей на графике
  LOCATE 1, 1: PRINT "Flw,мВб"; TAB(24); "Вариант "; v$
  PRINT USING "#####"; max.Flw * 1000!: PRINT : PRINT : PRINT
```

```
PRINT : PRINT USING "#####"; 75 * max.Flw * 10: PRINT : PRINT
PRINT : PRINT : PRINT USING "#####"; 50 * max.Flw * 10: PRINT
PRINT : PRINT : PRINT : PRINT USING "#####"; 25 * max.Flw * 10
PRINT : PRINT : PRINT : PRINT : PRINT TAB(5); "0"
PRINT USING "          ##.###  ##.###"; .25 * max.I; .5 * max.I;
PRINT USING "  ##.###    Iob,A"; .75 * max.I: PRINT "Рис.";
PRINT USING "#_. Кривые намагничивания (  ). Номер"; ik% + 3;
LOCATE 25, 1: PRINT "кривой-порядковый номер положения якоря";
VIEW: WINDOW   'возврат к экранным координатам
'Линия обозначения кривых намагничивания в подписи к рисунку
LINE (239, 187)-STEP(16, 0), 2  'фиолетовая
CALL Stkgr   'построение сетки графика со вводом окна (см. мо-
'дуль Vozvratc на с. 275 [2])
WINDOW (0, 0)-(max.I, max.Flw)
'-----------------------------------------------------------
LINE (F / w, 0)-(F / w, Flw0)   'вертикаль с абсциссой I=F/w
CIRCLE (F / w, Flw0), max.I / 128  'обозначение кружком точки с
'ординатой Flw0, которая определяется в п.2.1.1.
'Надпись рядом с точкой:
x% = POINT(0): x11% = x% + 43: x2% = x11% / 8 + 2: y% = POINT(1)
y1% = y% + 11: y2% = y1% / 8
IF y2% >= 1 AND x2% <= 40 THEN LOCATE y2%, x2%: PRINT "0"
CIRCLE (F / w, 0), max.I / 128  'обозначение кружком точки с
'током I=F/w на оси абсцисс
IF x2% <= 40 THEN LOCATE 21, x2%: PRINT "I"
FOR i% = 1 TO n%
  CIRCLE (F / w, Flw(i%)), max.I / 128   'обозначение
  'кружком точки на кривой намагничивания с абсциссой - током I
  'и ординатой - потокосцеплением Flw(i%)
  'Определение ординат надписей номеров кривых намагничивания:
  y% = POINT(1): y1% = y% + 11: y2% = y1% / 8 + 1 'изобр. номера
  IF y2% >= 1 AND x2% <= 40 THEN
    LOCATE y2%, x2%: PRINT USING "#"; i%
  END IF
 NEXT
END IF
IF ifd% = 1 THEN
 'Открытие структурированных файлов данных: массива значений то-
 'ков F/w, необходимых для создания назначаемых в подпрограмме
 'Fl.F в цикле FOR...NEXT магнитодвижущих сил F при разных поло-
 'жениях якоря; массива значений потокосцеплений Flw, соответ-
 'ствующих этим МДС и этим i%-м положениям якоря, а также массива
 'значений электромагнитных сил Pemx, которые развивает электро-
 'магнит, если при i%-м положении якоря в нем создаются эти МДС
 OPEN "iu.dat" FOR OUTPUT AS #9  'для токов
 OPEN "Flwu.dat" FOR OUTPUT AS #10  'для потокосцеплений
 OPEN "Pemxu.dat" FOR OUTPUT AS #11  'для электромагнитных сил
END IF

'       Расчет и построение кривых, вывод в файлы данных токов,
'потокосцеплений и электромагнитных сил
FOR i% = 1 TO n%
 IF vbp% = 1 THEN
  PSET (0, 0), 2  'установка графич. курсора в начало координат
 END IF
 IF ifd% = 1 THEN
  'Следующие три оператора формируют нулевые точки файлов:
  IF i% = 1 THEN PRINT #9, 0;   'так как при всех зазорах
  'задаются одинаковые токи, достаточно одного их комплекта
```

```
    PRINT #10, 0;
    PRINT #11, 0;
  END IF
  F0 = 0: n = .25: nF = .5: max.F = max.I * w
  GOSUB Fl.F  'расчет и построение кривой при              (7)
  '0<=F<=.5*max.F, вывод результатов расчетов в файлы данных
  F0 = .5 * max.F: n = 1: nF = 1
  GOSUB Fl.F  'расчет и построение кривой при              (8)
  '0<=F<=.5*max.F, вывод результатов расчетов в файлы данных

   IF ifd% = 1 THEN
     'Следующие два оператора обеспечивают в файлах #10 и 11
     'запись новой серии данных (для следующего i%) с новой строки.
     'В самой верхней строке каждого из этих файлов записываются
     'данные для i%=1 (притянутое положение якоря), в самой нижней
     '- для i%=n% (положение при максимальном рабочем зазоре)
     PRINT #10,
     PRINT #11,
   END IF
NEXT i%
IF vbp% = 1 THEN i$ = INPUT$(1)
SCREEN 0: WIDTH 80

IF ifd% = 1 THEN

   '    2.7. Формирование остальных файлов данных для расчета
   '                  динамики включения электромагнита

   '2.7.1. Вывод в файл исходных данных программы DU, необходимых
   'для продолжения работы в MCAD (числа положений якоря n%,
   'напряжения питания обмотки U, расстояния от оси поворота
   'якоря до оси сердечника R2 и длины минимального рабочего зазора
   ' Lmin); массы Mj и силы веса Pm якоря, рассчитанных здесь;
   'сопротивления обмотки rt и средней длины магнитопровода,
   'рассчитанных в программе DU.
   '  Масса якоря, приведенная к оси сердечника:
   Mj = lj * aj * bj * plmg * lj ^ 2 / 4 / R2 ^ 2            ' (9)
   'lj, aj, bj - длина и размеры поперечного сечения якоря  в м;
   'plmg - плотность материала магнитопровода в кг/м^3;
   'R2 - расстояние от оси поворота якоря до оси сердечника в м.
   Pm = Mj * 9.81 * lj / 2 / R2  'сила веса якоря в Н,         (10)
   'приведенная к оси сердечника (к рабочему зазору)
   '9.81 - ускорение силы тяжести (в м/с^2)
   OPEN "iddu.dat" FOR OUTPUT AS #6
   WRITE #6, n%, U, R2, Lmin, Mj, Pm, rt, lm
   CLOSE #6

   '2.7.2. Вывод в файл приведенных к оси сердечника
   'суммарных электромагнитных сил для построения
   'в MCAD статической тяговой характеристики электромагнита
   'и механических сил, зависящих только от перемещений
   OPEN "Pu.dat" FOR OUTPUT AS #7
   FOR i% = n% TO 1 STEP -1: PRINT #7, Pem(i%); Pmh(i%): NEXT
   CLOSE #7

   '2.7.3. Расчет и вывод в файл матрицы xPsi с двумя столбцами -
   'координатами квадратных (в MCAD) матриц токов обмотки и
   'электромагнитных сил. Левый столбец матрицы xPsi состоит из
   'вектора перемещений x(i%), а правый - из вектора потокосцепле-
```

```
    'ний Psi(i%). В MathCAD-документе токи и силы будем рассчитывать
    'для матрицы, в которой потокосцепление изменяется от Psi(n%)=0
    'до Psi(1)=Psimax=Flw(1) с шагом dPsi, а перемещения - от x(n%)
    '=0 до x(1), равной максимальной длине рабочего зазора L2(1).
    REDIM x(n%), Psi(n%)
    Psimax = Flw(1)  'максимальным считается потокосцепление    (11)
    'при притянутом якоре
    dPsi = Psimax / (n% - 1)  'шаг изменения потокосцепления
    Psi(n%) = 0  'исходное нулевое потокосцепление
    'Разбивка всего охватываемого диапазона потокосцеплений (от 0 до
    'Psimax) на n%-1 фиксированных исходных значений с шагом dPsi:
    FOR m% = n% - 1 TO 1 STEP -1: Psi(m%) = Psi(m% + 1) + dPsi: NEXT
    OPEN "xPsiu.dat" FOR OUTPUT AS #8
    FOR i% = n% TO 1 STEP -1
      x(i%) = L2(n%) - L2(i%)
      PRINT #8, x(i%); Psi(i%)  'в верхнюю строку файла выводятся
      'значения, соответствующие максимальному зазору (то-есть
      'нулевому перемещению якоря); в нижнюю - минимальному зазору.
      'Это делается потому, что в MCAD-документе расчет
      'осуществляется по отношению к перемещению x, а не по
      'отношению к длине зазора электромагнита.
    NEXT
    CLOSE #8
  END IF
END IF
CLOSE
'==============================================================
Fu: 'Подпрограмма расчета МДС Fl и потокосцепления рассеяния Fldw
           'по потоку Fl и МДС Fsub методом участков

GOSUB UmFl       'Расчет магнитного напряжения на участках
'                   МЦ, по которым протекает рабочий поток Fl
'     Подучастки ci%-ых участков (в диапазоне xc/2<x<lm2-xc/2)
Flx = Fl: Umm2c = 0: Fldw = 0
FOR x = lm2 - xc / 2 TO xc STEP -xc   'x отсчитывается
  'со стороны катушки, наиболее удаленной от рабочего зазора.
  'Итерации проводятся от больших значений x к меньшим.
  'Нижний предел изменения x выбирается таким, чтобы общее
  'количество подучастков всегда было ch%-1, но не ch%.
  Ummd = UmmLFl + Umm2c - Fsub * (lm2 - x) / lm2              (12)
  Fld = Ummd * Gd / ch%
  Flx = Flx + Fld 'см. точку А на рис.10.6 [2]
  Fldw = Fldw + Fld * x * w / lm2  'потокосцепление рассеяния   (13)
  IF Fld > 0 THEN
    Flmax(i%) = Flx: xm1 = x: xm2 = x - xc
    IF Sm2(1) < Sm2(2) THEN
      Bmax = Flmax(i%) / Sm2(1)
      IF Bmax > Bmax(i%) THEN
        Bmax(i%) = Bmax: Bmax$(i%) = "сердечн."
      END IF
    ELSEIF Sm2(1) >= Sm2(2) THEN
      Bmax = Flmax(i%) / Sm2(2)
      IF Bmax > Bmax(i%) THEN Bmax(i%) = Bmax: Bmax$(i%) = " скоба"
    END IF
  END IF
  B01 = Flx / Sm2(1): B = ABS(B01): GOSUB HB
  IF B01 < 0 THEN H = -H
  H01 = H: Umm2c(1) = H01 * xc
```

```
  B02 = Flx / Sm2(2): B = ABS(B02): GOSUB HB
  IF B02 < 0 THEN H = -H
  H02 = H: Umm2c(2) = H02 * xc
  Umm2c = Umm2c + Umm2c(1) + Umm2c(2)  'суммарное напряжение
  'на участках магнитопровода, на которых поток изменяется
NEXT x
'-------------------------------------------------------------
' Участки магнитопровода в диапазоне 0<x<xc/2, напряжение на
'которых не учтено в Umm2c (ci%-ые):
Umm2n = 0: Ummd = UmmLFl + Umm2c - Fsub * (lm2 - xc / 2) / lm2
Fld = Ummd * Gd / ch%  'поток рассеяния при x=xc/2
Flx0(i%) = Flx + Fld  'поток в магнитопроводе
'при x=0 (т. B на рис.10.6 [2])
IF Fld > 0 THEN
  Flmax(i%) = Flx0(i%): xm1 = xc / 2: xm2 = 0
  IF Sm2(1) < Sm2(2) THEN
    Bmax = Flmax(i%) / Sm2(1)
    IF Bmax > Bmax(i%) THEN Bmax(i%) = Bmax: Bmax$(i%) = "сердечн."
  ELSEIF Sm2(1) ≥ Sm2(2) THEN
    Bmax = Flmax(i%) / Sm2(2)
    IF Bmax > Bmax(i%) THEN Bmax(i%) = Bmax: Bmax$(i%) = " скоба"
  END IF
END IF
xmax(i%) = (xm1 + xm2) / 2
FOR ci% = 1 TO 2
  B0 = Flx0(i%) / Sm2(ci%): B = ABS(B0): GOSUB HB
  IF B0 < 0 THEN H = -H
  Umm2n(ci%) = H * xc / 2  'магн. напряжение на той части ci%-го
  'участка магнитопровода, которая находится на наибольшем
  'удалении от рабочего зазора и длина которой равна X1/2
  'Суммарное напряжение на этих участках магнитопровода:
  Umm2n = Umm2n + Umm2n(ci%)
NEXT ci%
'---------------------------------
'Участок магнитопровода, в котором поток не меняется и который
'расположен по другую от рабочего зазора сторону катушки
'(горизонтальная часть скобы):
B1 = Flx0(i%) / Sm3: B = ABS(B1): GOSUB HB
IF B1 < 0 THEN H = -H
Umm3 = H * lm3  'магнитное напряжение на нем
'---------------------------------
UmL4 = Flx0(i%) / G4  'магнитное напряжение на зазоре между
'сердечником и скобой
'---------------------------------
'Суммарное напряжение на магнитопроводе:
Umm = Umm1 + Umm2c + Umm3 + Umm2v + Umm2n

UmL = UmL123 + UmL4   'суммарное магнитное напряжение на зазорах
F1 = Umm + UmL   'МДС в конце итерации
RETURN
'==============================================================
Fl.F:   'Подпрограмма расчета координат точек кривой зависимости
        'потокосцепления от тока, ее построения и вывода в файлы
        'значений токов, потокосцеплений и электромагнитных сил

mF10 = max.F / np
FOR F = F0 + mF10 * n TO 1.01 * max.F * nF STEP mF10 * n
  'Абсцисса каждой точки (ток F/w) каждой кривой задаеся текущим
  'циклом FOR...NEXT (через МДС F), а ордината (потокосцепление Flw)
```

```
'определяется по потоку Fl путем прямого расчета МЦ методом
'участков, как это было описано в п.2.1 на с. 453 [2].
'При расчете в диапазоне 0<F<max.F/2 шаг в 4 раза меньше, чем
'при расчете в диапазоне max.F/2<F<max.F
'     Предварительные расчеты рабочего потока Fl0, который больше
'потока, соответствующего задаваемой циклом FOR...NEXT МДС обмотки
'F (комментарии см. в п.2.1 на с. 436 и в п.2.1.1 на с. 454 [2]):
H = F / lm: GOSUB BH   'см. с. 445 [2]
Fl0 = B * Sm1(1): stp = Fl0 / 2
DO
  Umm1 = 0
  FOR k% = 1 TO 3
    B = Fl0 / Sm1(k%): GOSUB HB   'см. с. 445 [2]
    Umm1(k%) = H * lm1(k%): Umm1 = Umm1 + Umm1(k%)
  NEXT k%
  Umm2 = 0
  FOR ci% = 1 TO 2
    B = Fl0 / Sm2(ci%): GOSUB HB: H0 = H
    B = Fl0 * kdF(i%) / Sm2(ci%): GOSUB HB: H1 = H
    H = (H0 + H1) / 2: Umm2 = Umm2 + H * lm2
  NEXT
  B = Fl0 * kdF(i%) / Sm3: GOSUB HB: Umm3 = H * lm3
  Umm = Umm1 + Umm2 + Umm3
  IF Umm < F THEN
    Fl0 = Fl0 + stp
  ELSEIF Umm = F THEN
    Fl0 = Fl0 + stp
  ELSE
    Fl0 = Fl0
  END IF
LOOP WHILE Umm < F
'       Окончательные расчеты, в которых определяются рабочий
'поток Fl и суммарное потокосцепление Flw, соответствующие
'в методе участков МДС F, задаваемой в цикле FOR...NEXT текущей
'подпрограммы (комментарии - в п. 2.1.2 на с. 454 [2])
Fl = Fl0: stp = Fl / 10:
DO   'этот цикл позволяет подобрать поток Fl, соответствующий
'МДС F, задаваемой циклом FOR...NEXT подпрограммы Fl.F
  Fsub = F

  GOSUB Fu 'подпрограмма расчета МДС F1 и потокосцепления     (14)
  'рассеяния Fldw по потоку Fl и МДС Fsub методом участков
  Fl1 = Fl: stp1 = stp: pgr1 = (F1 - F) * 100 / F
  IF ABS(pgr1) > pgr2 THEN
    IF F1 > F THEN
      Fl = Fl1 - stp
    ELSEIF F1 = F THEN
      Fl = Fl1
    ELSE
      Fl = Fl1 + stp: stp = stp1 / 10
    END IF
  END IF
LOOP WHILE ABS(pgr1) > pgr2
'  Ниже находятся основные строки, отличающие эту подпрограмму
'от аналогичной подпрограммы с таким же именем, но в модуле DC2
'программы DC, приведенной на с. 447 [2].
Fl = Fl1
Flw = Fl * w + Fldw  'суммарное потокосцепление              (15)
IF vbp% = 1 THEN
```

```
    LINE -(F / w, Flw), 2 'построение кривой зависимости потоко-
    'сцепления Flw от тока F/w
  END IF
  IF ifd% = 1 THEN                  'Расчет электромагнитной силы:
    skb = 1 / Sm1(3) / kb2(i%) ^ 2 + R1 / Sm1(1) / kb1(i%) ^ 2 / R2
    Pemx = Fl ^ 2 / (2 * m0) * skb                              ' (16)
    '  Вывод в файлы значений токов F/w, потокосцеплений Flw и
    'электромагнитных сил Pemx:
    IF i% = 1 THEN PRINT #9, F / w;  'так как при всех          (17)
    'зазорах задаются одинаковые токи, достаточно одного комплекта
    PRINT #10, Flw;                                            '  (18)
    PRINT #11, Pemx;                                           '  (19)
  END IF
NEXT
RETURN
'============================================================
ifelse: 'Подпрограмма переименования np и проверки правильности
  'ввода np
  IF np = 52 OR np = 26 OR np = 13 OR np = 7 THEN
    IF np = 52 THEN np = 20
    IF np = 26 THEN np = 10
    IF np = 13 THEN np = 5
    IF np = 7 THEN np = 2.5
  ELSE
    CLS : LOCATE 10, 10: PRINT "Вы ошиблись при вводе числа точек."
    PRINT TAB(10); "Можно вводить только 52, 26, 13, 7."
    INPUT "          Повторите ввод.  "; np: GOSUB ifelse
  END IF
RETURN
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

ФАЙЛЫ ДАННЫХ, ВЫВОДИМЫЕ QB-ПРОГРАММОЙ DU И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ MCAD-ДОКУМЕНТОМ DUON

1) <u>iddu.dat</u>

```
5,220,.055,.0001,.3523386,2.985109,705.5373,.2724569
```

2) <u>xpsiu.dat</u>

```
 0  0
 .0050325  4.020147
 .010065  8.040295
 .01056  12.06044
 .013915  16.08059
```

3) <u>iu.dat</u>

```
 0  .015  .03  4.500001E-02  .06  .075  .09  .105  .12  .135  .15
.21  .27
```

4) <u>flwu.dat</u>

```
 0  4.506154  9.174752  11.75602  12.92159  13.43284  13.92068  _
14.20369  14.43102  14.64286  14.84973  15.56603  16.12182
 0  1.187011  2.383165  3.569317  4.742269  6.028207  7.233331  _
```

```
8.434964  9.467741  10.53368  11.63537  13.68118  14.71834
 0  1.09931  2.207386  3.334779  4.47679  5.611622  6.75997  _
7.839136  8.88818  9.968342  10.86586  13.35375  14.47855
 0  .7609041  1.507286  2.275199  3.045895  3.817047  4.586974  _
5.329491  6.04389  6.930593  7.688409  10.56276  12.64596
 0  .6489719  1.298319  1.957111  2.602735  3.26955  3.930406  _
4.611332  5.25645  5.920018  6.602465  9.189694  11.43946
```

5) pemxu.dat

```
 0  42.82899  177.5152  289.9541  348.2363  371.8148  394.7961  _
409.6515  422.063  433.7204  444.546  479.0615  508.504
 0  1.232395  4.964137  11.13892  19.70307  31.78003  45.7907  _
62.27837  78.69694  97.50485  118.8456  167.4249  197.221
 0  .9698186  3.907232  8.905243  16.04353  25.22618  36.61028  _
49.30988  63.47849  79.8492  95.12906  146.0929  174.837
 0  .2284836  .8989189  2.044669  3.660472  5.745326  8.297138  _
11.22172  14.47075  18.9401  23.32566  44.23233  64.41485
 0  9.928481E-02  .3973334  .9014856  1.595644  2.514155  _
3.631742  4.991681  6.49452  8.239394  10.24128  19.89  31.09071
```

6) pu.dat

```
 29.86848  8
 62.38066  29
 172.6565  50
 194.8117  120
 506.2209  200
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПОСТОЯННОГО ТОКА (РАБОЧИЙ ДОКУМЕНТ DUON.mcd)

Создан 9.97. Автор — Буль О. Б., МГОУ.

Настоящий рабочий документ является продолжением QuickBASIC (QB)-программы DU расчета электромагнита постоянного тока с поворачивающимся якорем, которая близка к программе DC, описанной в [2]. Для исследования процесса включения электромагнита предварительное исполнение программы DU является обязательным, так как текущий MCAD-документ пользуется результатами ее работы (через дисковые файлы данных).

Сопротивление магнитопровода; потоки рассеяния и выпучивания; зазоры между якорем и скобой, сердечником и скобой, полюсным наконечником и сердечником; сила веса якоря электромагнита, сухое трение и демпфирование (вязкое трение) учитываются. Использованы функции **cspline** и **interp** интерполяции зависимостей тока и электромагнитной силы от потокосцепления и перемещения, а также функция **linterp** линейной интерполяции составляющей механической характеристики, зависящей от перемещения, и, наконец, вводятся специальные функции для составляющих механической характеристики, зависящих от перемещения и скорости. Не учитываются: вихревые токи в магнитопроводе; гистерезис материала магнитопровода; влияние вибрации подвижной контакт-детали после соударения ее с неподвижной. Так как масса контакт-деталей обычно существенно меньше массы якоря и жестко скрепленных с ним частей механизма, можно считать последнее вполне допустимым.

1. Обоснование методики

Исходные дифференциальные уравнения, приведенные к нормальной форме:

$$d\psi/dt = U - i \cdot R_\theta;$$
$$dx/dt = v;$$
$$dv/dt = (P_{em} + P_m - P_{mh})/M.$$

Здесь ψ — суммарное (максимальное) потокосцепление электромагнита, Вб; t — время, с; U — напряжение, В; i — ток обмотки, А; R_θ — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом; x — перемещение якоря вдоль оси сердечника, м (отсчитывается от положения якоря при максимальном зазоре); v — скорость якоря, м/с; P_{em} — электромагнитная сила, Н; P_m — сила веса якоря, действующая в рассматриваемой конструкции в ту же сторону, что и электромагнитная, Н; P_{mh} — сила механизма, противодействующая электромагнитной; M — масса якоря, кг. Под величинами ψ, x, v, i, P_{em}, P_m, P_{mh}, изменяющимися во времени t, имеются в виду их мгновенные значения. Величины U, R_θ и M от времени не зависят.

В этих уравнениях кроме ψ, x и v неизвестными являются также i, P_{em}, P_m и P_{mh}. Выразим четыре последних через ψ, x и v и выделим в P_{mh} три ее составляющие:

$$d\psi/dt = U - i(x,\psi) \cdot R_\theta; \quad (1)$$
$$dx/dt = v; \quad (2)$$
$$dv/dt = (P_{em}(x,\psi) + P_m(x) - P_{mh1}(x) - P_{mh2}(x,v) - P_{mh3}(v))/M. \quad (3)$$

Здесь $i(x,\psi)$ — функция, определяемая путем сплайн-интерполяции семейства зависимостей тока обмотки от положения якоря и потокосцепления; $P_{em}(x,\psi)$ — функция, определяемая путем сплайн-интерполяции семейства зависимостей электромагнитной силы от положения якоря и потокосцепления; $P_m(x)$ — сила веса якоря; $P_{mh1}(x)$ — функция, определяемая путем линейной интерполяции упругой составляющей механической характеристики, зависящей только от перемещения; $P_{mh2}(x,v)$ — функция, определяемая вязкой составляющей механической характеристики, зависящей от перемещения и скорости; $P_{mh3}(v)$ — сила сухого трения. При ориентации электромагнита, как на рис. 10.2 [2] (якорем вверх), сила веса якоря $P_m(x)$ действует в ту же сторону, что и электромагнитная (см. п. 2.5). В тексте Приложения 14 приводятся ссылки на пункты текущего рабочего документа без дополнительных пояснений; если ссылка относится к пункту основного текста, то это оговаривается особо. Сила сухого трения $P_{mh3}(v)$ направлена против направления движения. Ее значение, если не учитывать особого участка при скоростях, близких к нулю, не зависит от перемещения и модуля скорости, но является функцией знака скорости (подробнее см. п. 2.9). Все усилия сопротивления движению, пропорциональные скорости, учитываются с помощью эквивалентных коэффициентов демпфирования. Исходные дискретные значения для функций $i(x,\psi)$ и $P_{em}(x,\psi)$ рассчитываются в QB-программе DU, выводятся в дисковые файлы, читаются настоящим рабочим документом и преобразуются в непрерывные функции. Функции $P_m(x)$, $P_{mh2}(x,v)$ и $P_{mh3}(v)$ вводятся в DUON.mcd.

Рассматриваемая система состоит из трех обыкновенных (с одной независимой переменной — временем t) дифференциальных уравнений первого порядка с известными начальными условиями ($\psi(0) = 0$, $x(0) = 0$, $v(0) = 0$). Уравнения (1) и (3) нелинейны, так как $i(x,\psi)$ и $P_{em}(x,\psi)$ отражают нелинейный характер связи между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля материала магнитопровода. Ниже эта система уравнений решается с помощью функции **Rkadapt**, использующей метод Рунге — Кутта с шагом, который автоматически приспосабливается к ее особенностям.

2. Исходные данные

Основные исходные данные DUON.mcd извлекает из дисковых файлов, которые предварительно должны быть ассоциированы с файловыми переменными — аргу-

ментами функций **READ** и **READPRN** —, если дисковые файлы находятся не в текущей директории, из которой запускается документ DUON.mcd.

2.1. Величины, не зависящие от времени

Они включены в файл данных **iddu.dat**, который содержит 8 элементов. Если их значения присвоить вектору **id**, то файл можно прочитать с помощью дискретной переменной **m** и функции **READ**:

$m := 0..6; \quad id_m := READ(iddu_{dat})$.

Переменная, совпадающая с именем файла, позволяет функции **READ**, а в других аналогичных случаях и функции **READPRN** прочитать этот файл в текущем каталоге без обращения к меню File — Associate Filename.

Заметим, что 8-й элемент файла данных **iddu.dat** в настоящем документе не используется, поэтому предельное значение m равно 6, а не 7. 8-й элемент включен в **iddu.dat** потому, что нужен другому рабочему документу MCAD.

Ниже слева исходным данным в строках математической области присваиваются имена, а справа после точки с запятой и пробела показано их числовое значение.

Порядковый номер последнего положения якоря, для которого сделан расчет в QB-программе,

$N := id_0 - 1; \quad N = 4$.

В MCAD-документе положения якоря нумеруются от нуля, поэтому их общее число равно **N+1**.

Напряжение в В:

$U := id_1; \quad U = 220$.

Расстояние от оси поворота якоря до оси сердечника:

$R2 := id_2; \quad R2 = 0.055$.

Длина минимального рабочего немагнитного зазора в м:

$\delta_{min} := id_3; \quad \delta_{min} = 1 \cdot 10^{-4}$.

Масса движущихся частей в кг:

$M := id_4; \quad M = 0.352$. **(4)**

Сила веса якоря, приведенная к оси сердечника при горизонтальном положении якоря, в Н:

$Pm := id_5; \quad Pm = 2.985$. (5)

Сопротивление обмотки в Ом:

$R_\theta := id_6; \quad R_\theta = 705.537$.

Жесткость в Н/м эквивалентных пружин, заменяющих статическую механическую характеристику на участках упругой деформации пар:
якорь-полюсный наконечник:

$c_{jp} := 10^7; \quad c_{jp} = 1 \ 10^7$;

якорь-ограничитель хода якоря (опора якоря):

$c_{jo} := 10^6; \quad c_{jo} = 1 \cdot 10^6.$

Эквивалентный коэффициент демпфирования во время рабочего хода якоря в Н/(м/с) (взят близким к d_1 на с. 110 — 111 [5]):

$d := 100.$

Эквивалентные коэффициенты демпфирования при соударении якоря с полюсным наконечником $\mathbf{d_{jp}}$ и якоря с опорой якоря $\mathbf{d_{jo}}$ в Н/(м/с) (взяты близкими к d_2 на с. 110 — 111 [5]):

$d_{jp} := 1 \cdot 10^3; \quad d_{jp} = 1 \cdot 10^3;$

$d_{jo} := 1000; \quad d_{jo} = 1 \cdot 10^3.$

Сила сухого трения в Н:

$P_c := 1; \quad P_c = 1.$

Жесткость зависимости силы сухого трения от скорости при скоростях, близких к нулю, в Н/(м/с):

$c_c := 1000.$

Введенные выше значения M, Pm, $\mathbf{c_{jo}}$, $\mathbf{c_{jp}}$, **d**, $\mathbf{d_{jp}}$ и $\mathbf{d_{jo}}$, $\mathbf{c_c}$, $\mathbf{P_c}$, как и силы, которые будут введены в п. 2.4 — 2.9, для систем с поворачивающимся якорем должны быть приведены к рабочему немагнитному зазору.

2.2. Перемещения якоря и потокосцепления

Матрица xψ перемещений x и потокосцеплений ψ заполняется документом DUON из файла данных **xPsiu.dat**, который считывается функцией **READPRN**:

$$x\psi := \mathrm{READPRN}(xPsiu_{dat}); \quad x\psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.005 & 4.02 \\ 0.01 & 8.04 \\ 0.011 & 12.06 \\ 0.014 & 16.081 \end{bmatrix}.$$

Перемещения якоря находятся в левом столбце матрицы xψ. Вектор перемещений:

$$vx := x\psi^{<0>}; \quad vx \cdot 1000 = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.032 \\ 10.065 \\ 10.56 \\ 13.915 \end{bmatrix}.$$

Потокосцепления находятся в правом столбце матрицы $x\psi$. Вектор потокосцеплений:

$$v\psi := x\psi^{<1>}; \quad v\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 4.02 \\ 8.04 \\ 12.06 \\ 16.081 \end{bmatrix}.$$

Полный ход якоря определяется как разность между его конечным vx_N и начальным vx_0 перемещениями:

$\Delta x := vx_N - vx_0; \quad \Delta x = 0.014.$

Максимальное потокосцепление:

$\psi_{max} := v\psi_N; \quad \psi_{max} = 16.081.$

2.3. Матрица токов

В файле данных **iu.dat** находятся токи, которые задавались в QB-программе DU для расчета соответствующих им потокосцеплений. Присваиваем эти значения токов элементам однострочной матрицы **vi** с помощью функции **READPRN**:

$vi := READPRN(iu_{dat});$

vi =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0.015	0.03	0.045	0.06	0.075	0.09	0.105	0.12	0.135	0.15	0.21	0.27

Самый большой порядковый номер элементов этой матрицы

$C := cols(vi) - 1; \quad C = 12.$

Дискретная переменная для обращения к ее элементам

$c := 0..C.$

Значения потокосцеплений, соответствующих токам **vi**, находятся в матрице **mFlw**, вводимой в документ DUON.mcd из файла данных **Flwu.dat**, записанного QB-программой DU. В приведенной ниже матрице **mFlw** каждый столбец соответствует току обмотки, который находится в матрице **vi** в столбце с тем же номером. Каждая строка соответствует расчетному положению якоря, причем верхняя строка — минимальному немагнитному рабочему зазору (максимальному перемещению якоря), нижняя — максимальному зазору (исходному перемещению якоря $x = 0$).

$mFlw := READPRN(Flwu_{dat}).$

mFlw =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	4.506	9.175	11.756	12.922	13.433	13.921	14.204	14.431	14.643
1	0	1.187	2.383	3.569	4.742	6.028	7.233	8.435	9.468	10.534
2	0	1.099	2.207	3.335	4.477	5.612	6.76	7.839	8.888	9.968
3	0	0.761	1.507	2.275	3.046	3.817	4.587	5.329	6.044	6.931
4	0	0.649	1.298	1.957	2.603	3.27	3.93	4.611	5.256	5.92

Искомую функцию $i(x,\psi)$, необходимую дифференциальному уравнению (1), непосредственно с помощью матриц **vi** и **mFlw** получить нельзя. MCAD позволяет проводить сплайн-интерполяцию, чтобы получить функцию двух переменных, но для этого он требует создания особой матрицы: число ее строк должно быть равно числу столбцов, матрица должна быть заполнена значениями ординат опорных точек в полученной квадратной сетке. В нашем случае матрица должна состоять из значений токов, в каждой ее строке токи должны соответствовать неизменным в пределах одной строки положениям якоря, назначенным для каждой строки своим элементом вектора **vx**, а в каждом столбце токи должны соответствовать неизменным в пределах одного столбца потокосцеплениям, назначенным своим элементом вектора $v\psi$. Для получения такой матрицы мы должны уметь для любого заданного положения якоря рассчитать значение тока в обмотке, требуемое для любого фиксированного потокосцепления. Такую матрицу можно получить с помощью нескольких последовательных преобразований данных, введенных из файлов **iu.dat** и **Flwu.dat**, включая предварительные интерполяции функции одной переменной и окончательную — функции двух переменных. Покажем, как это сделать.

Предварительные интерполяции

Для удобства дальнейших расчетов матрицы **vi** и **mFlw** транспонируем:

$vi^T =$

	0
0	0
1	0.015
2	0.03
3	0.045
4	0 06
5	0.075
6	0.09
7	0.105
8	0 12
9	0 135
10	0.15
11	0 21
12	0 27

$mFlw^T =$

	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	4.506	1.187	1 099	0.761	0.649
2	9.175	2.383	2.207	1.507	1.298
3	11 756	3.569	3.335	2.275	1.957
4	12.922	4.742	4.477	3 046	2.603
5	13.433	6.028	5.612	3.817	3.27
6	13 921	7.233	6.76	4.587	3.93
7	14.204	8.435	7.839	5.329	4 611
8	14.431	9 468	8.888	6.044	5.256
9	14 643	10.534	9 968	6 931	5.92
10	14.85	11.635	10.866	7.688	6.602
11	15.566	13.681	13.354	10 563	9.19
12	16.122	14.718	14.479	12.646	11.439

Следует обратить внимание на то, что токи при перемещении $x=0$ находятся в самом правом столбце матрицы $\mathbf{mFlw}^T$, имеющем порядковый номер 4. Обратим также внимание на то, что строка матрицы $\mathbf{mFlw}^T$ с номером 12 содержит потокосцепления, только одно из которых (в 0-м столбце — при $x=\Delta x$) больше максимального фиксированного потокосцепления $v\psi_4$, назначенного QB-программой для сплайн-интерполяции функции $i(x,\psi)$. Это говорит о том, что при потокосцеплениях, равных $v\psi_4$, аппроксимация едва ли будет удовлетворительной, так как при больших потокосцеплениях она фактически превращается в экстраполяцию, для которой функция interp, используемая нами ниже, вообще говоря, не предназначена. Сказанное подтверждает верхняя кривая на рис. 3. Увеличить максимальные значения потокосцеплений в векторе $\mathbf{mFlw}^T$ можно только путем увеличения значения максимального тока **max.I**, вводимого по запросу с экрана в QB-программе DU.

Для первого (с порядковым номером 0) столбца матрицы $\mathbf{mFlw}^T$ и вектора $\mathbf{vi}^T$ вторые производные интерполяционной кривой в точках, соответствующих 13 строкам исходных векторов:

$$vsI0 := cspline[(mFlw^T)^{<0>}, vi^T];$$

для последнего (он нам потребуется далее для ввода функции $\mathbf{IN}(\psi)$):

$$vsIN := cspline[(mFlw^T)^{<N>}, vi^T].$$

Вектор токов, соответствующий узловым значениям потокосцеплений, заключенных в векторе $\mathbf{v}\psi$, определяется с помощью оператора векторизации, который позволяет сразу вычислить набор интерполируемых значений токов. Для первого столбца матрицы $\mathbf{mFlw}^T$:

$$vI0 := \overrightarrow{interp[vsI0, (mFlw^T)^{<0>}, vi^T, v\psi]}; \quad vI0_N = 0.265.$$

Вектор $\mathbf{vI0}$ содержит пять значений токов, соответствующих пяти значениям потокосцеплений вектора $\mathbf{v}\psi$ для одного перемещения якоря $\mathbf{x} = \Delta\mathbf{x}$, причем верхняя цифра вектора $\mathbf{vI0}$ ($\mathbf{vI0}_0 = 0$) соответствует верхней цифре вектора $\mathbf{v}\psi$ ($\mathbf{v}\psi_0 = 0$), нижняя цифра вектора $\mathbf{vI0}$ (в нашем случае $\mathbf{vI0}_N = \mathbf{vI0}_4 = 0.265$) — нижней цифре $\mathbf{v}\psi$ ($\mathbf{v}\psi_N = \mathbf{v}\psi_4 = 16.081$).

Векторы токов для остальных положений якоря можно рассчитать аналогично, однако для пользователей, работающих с профессиональными редакциями MCAD версий не ниже 6.0 Plus, лучше это сделать в цикле (уже сделанный расчет для первого столбца матрицы $\mathbf{mFlw}^T$ в нем повторяется еще раз):

```
vI :=  | for n ∈ 0..N
       |    | vsI ← cspline[(mFlw^T)^<n>, vi^T]
       |    | vI_n ← interp[vsI, (mFlw^T)^<n>, vi^T, vψ]   (vectorized →)
       | vI
```

$$vI = \begin{bmatrix} \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \end{bmatrix}$$

По этой программе получаем вектор $\mathbf{vI}$, каждый элемент которого сам является вектором. Ниже функцию введенного ранее вектора $\mathbf{vI0}$ будет выполнять вектор $\mathbf{vI}_0$.

$$vI_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.014 \\ 0 025 \\ 0.047 \\ 0 265 \end{bmatrix} \qquad vI_N = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.092 \\ 0.182 \\ 0.288 \\ 0.433 \end{bmatrix}$$

Далее следует для создания искомой квадратной матрицы токов, необходимой для сплайн-интерполяции функции $\mathbf{i}(\mathbf{x},\psi)$ двух переменных — перемещения $\mathbf{x}$ и потокосцепления ψ,— векторы от $\mathbf{vI}_0$ до $\mathbf{vI}_N$ транспонировать и поставить друг на друга так, чтобы в получившейся при этом квадратной матрице токов сверху оказался

последний (в нашем случае вектор $vI_N{}^T$), соответствующий токам при $x=0$, так как для дальнейшей сплайн-интерполяции функции двух переменных ряды токов матрицы должны располагаться в порядке возрастания x сверху вниз. Установку одной матрицы над другой обеспечивает функция **stack**. Транспонированные последний vI_N и первый (с индексом 0) vI_0 векторы:

$$vI_N{}^T=(0\ 0.092\ \ 0.182\ \ 0.288\ \ 0.433);\quad vI_0{}^T=(0\ \ 0.014\ \ 0.025\ \ 0.047\ \ 0.265).$$

Установку одной матрицы над другой удобно осуществить с помощью программы, которая делает это в цикле с помощью локальной переменной — матрицы **I**:

$$ixPsi := \left| \begin{array}{l} I \leftarrow stack\left[\left(vI_N{}^T\right), vI_{N-1}{}^T\right] \\ \text{for } n \in N-2..0 \\ \quad I \leftarrow stack\left(I, vI_n{}^T\right) \\ I \end{array} \right.$$

Значения токов в векторах от vI_0 до vI_N располагаются таким образом, что они соответствуют значениям фиксированных потокосцеплений вектора $v\psi$ в порядке возрастания сверху вниз; в векторах от $vI_0{}^T$ до $vI_N{}^T$ и в полученной матрице **ixPsi** значения токов располагаются так, что они соответствуют значениям фиксированных потокосцеплений в порядке возрастания слева направо. Так, в матрице самый левый столбец токов соответствует значению потокосцепления $v\psi_0=0$, а самый правый — потокосцеплению $v\psi_N=v\psi_4=16.081$ Вб.

$$ixPsi=\begin{bmatrix} 0 & 0.092 & 0.182 & 0.288 & 0.433 \\ 0 & 0.079 & 0.157 & 0.251 & 0.446 \\ 0 & 0.054 & 0.108 & 0.172 & 0.424 \\ 0 & 0.051 & 0.1 & 0.158 & 0.393 \\ 0 & 0.014 & 0.025 & 0.047 & 0.265 \end{bmatrix}$$

На рис. 1 зависимостей тока от потокосцепления кружками и квадратиками показаны точки, построенные по данным файлов. Их ординаты (токи) соответствуют вектору vi^T, абсциссы (потокосцепления) — первому (с номером 0) столбцу матрицы $mFlw^T$ (кружки) и последнему (с номером 4) столбцу этой матрицы (квадратики). Таких кружков и квадратиков всего по 13 (равно числу строк вектора vi^T и матрицы $mFlw^T$). Штриховой и сплошной линиями показаны интерполяционные функции, построенные для диапазона изменения потокосцеплений

$$\psi:=0,0.1..16$$

по формулам

$$I0(\psi):=interp[vsI0,(mFlw^T)^{<0>},vi^T,\psi]$$

(для нулевого столбца матрицы $mFlw^T$, что соответствует $x=\Delta x$ и притянутому положению якоря);

$$IN(\psi):=interp[vsIN,(mFlw^T)^{<N>},vi^T,\psi]$$

(для самого правого столбца матрицы **mFlw**^{T}, что соответствует $x=0$ и положению якоря при максимальном зазоре).

Функция IN(ψ) соответствует исходному положению якоря ($x=0$, на рис. 1 — сплошная кривая слева сверху), I0(ψ) — притянутому ($x=\Delta x$, на рис. 1 — штриховая кривая справа снизу).

Наконец, крестиками нанесены точки, ординаты которых соответствуют числам верхнего (с номером 0) и нижнего (5-го) ряда матрицы **ixPsi** (последний имеет номер $N=4$), абсциссы — числам вектора vψ. Точки токов пятого ряда матрицы **ixPsi**, соответствующие перемещениям $x=\Delta x$, изображены крестиками, линии которых направлены под углом 45° к горизонтали; точки токов нулевого ряда матрицы **ixPsi**, соответствующие перемещениям $x=0$, изображены крестиками, линии которых горизонтальны и вертикальны. Для двух описанных кривых в качестве дискретной переменной взята

n:=0..N.

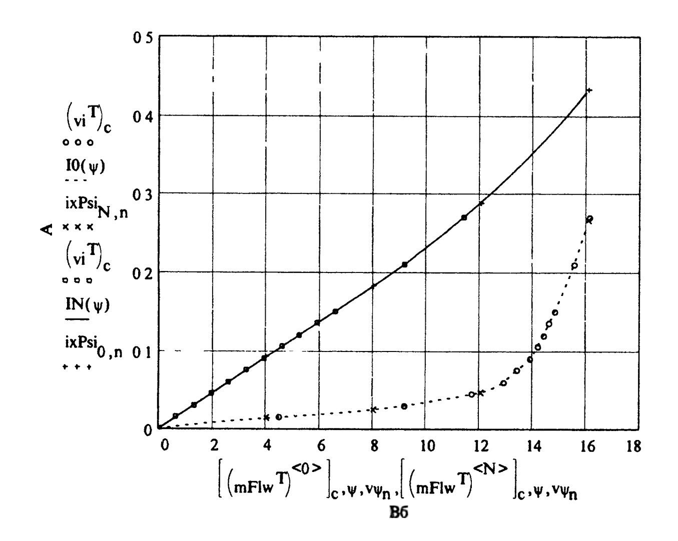


Рис. 1

Три верхних переменных вдоль оси тока и три левых вдоль оси потокосцеплений на рис. 1 соответствуют точкам и кривой для притянутого положения якоря, при котором $x=\Delta x$; три нижних переменных вдоль оси тока и три правых вдоль оси потокосцеплений соответствуют максимальному зазору, при котором $x=0$. Заметим также, что если в QB-программе DU порядок нумерации был принят от меньших зазоров к большим, что отражается, например, в порядке нумерации столбцов матрицы **mFlw**^{T}, то в документе DUON порядок нумерации положений якоря принят от меньших перемещений x к большим, что соответствует порядку нумерации от больших зазоров к меньшим, т. е. порядку, противоположному принятому в QB-программе DU. Именно по этой причине интерполирующая нулевой столбец матрицы **mFlw**^{T} функция I0(ψ), в чьем имени присутствует ноль, соответствует тому же положению якоря, что и строка матрицы **ixPsi** с номером N (см. 2-ю и 3-ю сверху переменные вдоль оси ординат на рис. 1).

Рис. 1 показывает, что три зависимости каждого из двух положений якоря практически лежат на одной кривой, что говорит о достаточно высокой точности проведенной интерполяции.

Окончательная интерполяция

Для двумерной сплайн-интерполяции матрицы **ixPsi** вычислим вектор **si**, содержащий вторые производные приближающей поверхности в узлах, определенных матрицами **x**ψ и **ixPsi**:

si: = cspline(xψ,ixPsi).

Искомая функция **i(x,**ψ**)** позволяет найти значение тока в произвольной точке с координатами **x** и ψ:

$$i(x,\psi):=\mathrm{interp}\left[si,x\psi,ixPsi,\begin{pmatrix}x\\ \psi\end{pmatrix}\right].$$

Построение двумерных параметрических графиков

Расчет значений параметров кривых на рис. 2 и рис. 7:

$vx_0\cdot 1000=0$; $vx_1\cdot 10^3=5.032$; $vx_2\cdot 10^3=10.065$; $vx_3\cdot 10^3=10.56$; $vx_N\cdot 10^3=13.915$.

Диапазон значений потокосцепления определяется дискретной переменной

$\psi:=0,0.01\cdot\psi_{max}..\psi_{max}$.

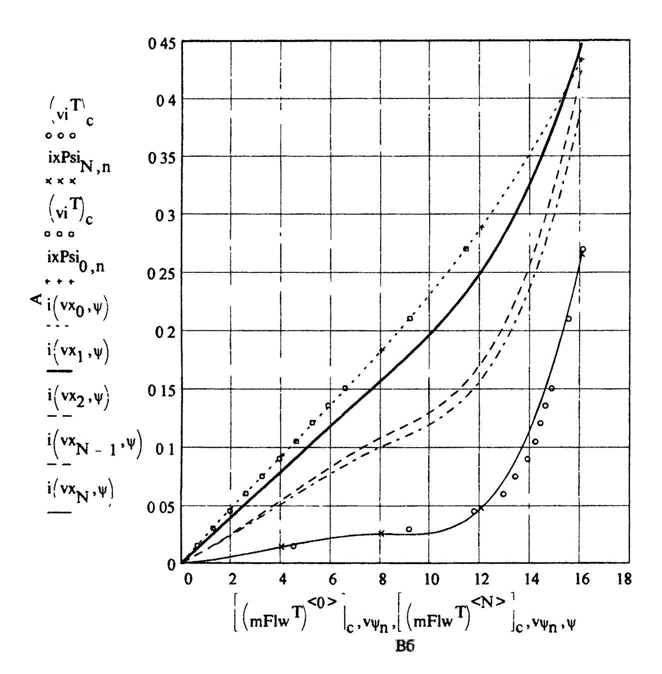


Рис. 2

На рис. 2 полученная функция изображена в прямоугольной системе координат в виде серии кривых, в которых одна из переменных (потокосцепление) откладывается по оси абсцисс, а другая (перемещение) является параметром, постоянным для каждой кривой, но разным для всех кривых. Рис. 2 наглядно представляет полученную функцию, но обладает недостатком, так как число и значение его переменных по оси ординат для изображения всех кривых при всех фиксированных положениях якоря необходимо изменять пользователю в случае, если номер последнего положения якоря N отличается от принятого в этом документе N=4 (таким же недостатком обладают и рис. 3, 7 и 8). Рис. 2 показывает, что интерполяция исходных данных при притянутом якоре (при $x=\Delta x$) оказалась весьма посредственной (точки в виде кружков не лежат на тонкой сплошной линии). Это говорит о том, что для увеличения точности расчета необходимо увеличивать число N+1 строк и столбцов квадратной матрицы ixPsi, а не уменьшать. При N=5 можно добавить аргумент $i(vx_3,\psi)$, при N=6 — аргумент $i(vx_4,\psi)$ и т. д. Неточность интерполяции на рис. 2 проявилась также в пересечении двух верхних кривых (при vx_0 и vx_1).

Диапазон значения перемещений определяется дискретной переменной

$x:=0,0.00001..\Delta x$.

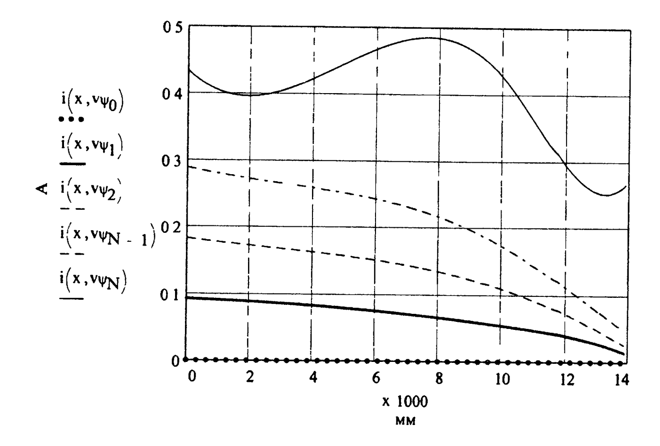


Рис. 3

Параметры кривых, построенных на рис. 3 и 8:

$v\psi_0=0$; $v\psi_1=4.02$; $v\psi_2=8.04$; $v\psi_3=12.06$; $v\psi_N=16.081$.

Как уже было сказано, интерполяционная кривая $i(x,\psi)$ при максимальном потокосцеплении $v\psi_N=v\psi_4=16.081$, т. е. кривая $i(x,v\psi_N)$ на рис. 3, выглядит сомнительно. Так как при включении потокосцепление не превосходит его установившегося значения (см. рис. 16) и приближается к нему в конце хода якоря, т. е. при x, приближающемся к Δx, то, по-видимому, ошибка в интерполяции функции $i(x,\psi)$ при больших значениях потокосцеплений не окажет существенного влияния на точность расчета всего процесса.

Построение трехмерных графиков функции $i(x,\psi)$

MCAD может отобразить на трехмерном графике только матрицу, но не функцию. Для отображения матрицы необходимо, чтобы она была квадратной и чтобы координаты точек матрицы составляли на плоскости сетку с равномерным шагом по

обеим осям. Матрица ixPsi удовлетворяет первому условию, но не последнему, так как при равномерном шаге по оси потокосцеплений шаг по оси перемещений — разный. К счастью, исходную матрицу легко преобразовать в квадратную с любым равномерным шагом по осям координат. Значения необходимых для этого элементов вновь созданной матрицы можно рассчитать по уже введенной интерполяционной функции. Число узлов такой равномерной сетки должно быть кратно N+1 — числу элементов в векторах перемещений vx и потокосцеплений $v\psi$.

Покажем, как создать матрицу $ix\psi$ с числом узлов равномерной квадратной сетки $[4\cdot(N+1)]\cdot[4\cdot(N+1)]$, соответствующую функции $i(x,\psi)$, которая получена путем сплайн-интерполяции значений токов матрицы ixPsi на сетке $(N+1)\cdot(N+1)$, неравномерной по оси x (кратность не обязательно должна быть равна четырем, как принято в текущем рабочем документе).

Элементам левого столбца матрицы $x\psi$ с номерами 0 и N присваиваются имена:

$$xlow:=x\psi_{0,0};\quad xhigh:=x\psi_{N,0};$$

аналогичным элементам правого столбца той же матрицы — имена:

$$ylow:=x\psi_{0,1};\ yhigh:=x\psi_{N,1}.$$

Общее число элементов левого столбца вновь создаваемой матрицы $ix\psi$:

$$xn:=4\cdot(N+1);$$

правого столбца:

$$yn:=4\cdot(N+1).$$

Дискретная переменная для обозначения элементов левого столбца новой матрицы

$$k:=0..xn+1;$$

правого:

$$j:=0..yn-1.$$

Примем для вновь созданной матрицы шаг изменения координаты x равным $(xhigh-xlow)/(xn-1)$, а шаг изменения координаты y равным $(yhigh-ylow)/(yn-1)$. Тогда любой текущий элемент левого столбца вновь создаваемой матрицы

$$xind_k:=xlow+k\cdot\frac{xhigh-xlow}{xn-1};$$

правого столбца

$$yind_j:=ylow+j\cdot\frac{yhigh-ylow}{yn-1};$$

всей матрицы

$$ix\psi_{k,j}:=i(xind_k,yind_j).$$

Следует отметить, что описанное преобразование функции в матрицу не является необходимым элементом расчета процесса включения электромагнита. Оно сделано здесь только для построения трехмерных графиков.

Поверхность, соответствующая матрице $ix\psi$, изображена на рис. 4 для установок по умолчанию (вращение 10°, наклон 35°). Значение тока в А отложено по вертикальной оси. По осям перемещений x (левая на нижней прямоугольной плоскости) и по

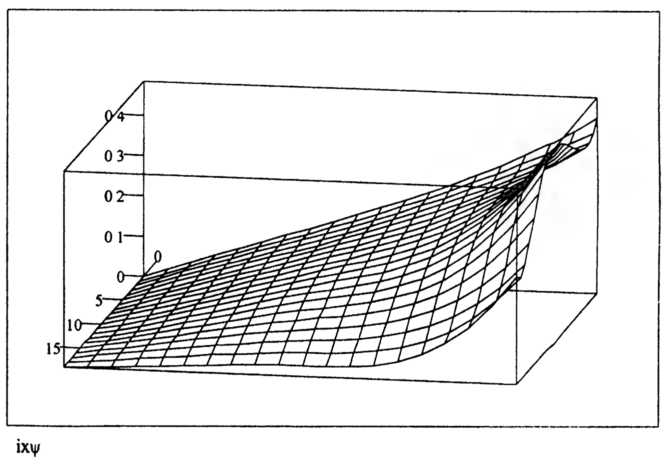


Рис. 4

оси потокосцеплений (правая, ориентированная почти горизонтально) отложены не значения перемещений и потокосцеплений, а порядковые номера узлов матрицы. Так как узлов, для которых рассчитана и построена поверхность, всего 20 · 20, то поверхность представляет собой сетку из криволинейных прямоугольников общим числом 19 · 19.

На рис. 5 представлена карта линий уровня той же матрицы, построенная тоже с установками по умолчанию. Сравнение рис. 4 и рис. 5 показывает, что оси x и ψ на них при установках по умолчанию ориентированы по-разному: если смотреть с

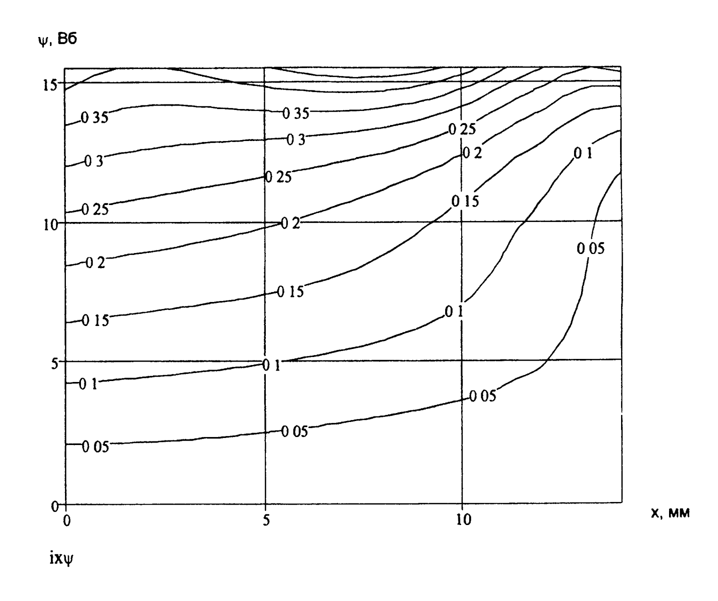


Рис. 5

конца положительных значений оси тока i рис. 4 на плоскость x,ψ, то соответствие в направлении осей перемещения x и потокосцепления ψ между рис. 4 и 5 будет только в том случае, если повернуть рис. 5 по часовой стрелке на 90°.

На картах линий уровня (рис. 5 и 10) максимальная длина оси перемещений (горизонтальная) принята равной максимальному перемещению Δx, оси потокосцеплений — максимальному потокосцеплению $v\psi_N$ из вектора назначенных QB-программой потокосцеплений.

2.4. Матрица значений электромагнитных сил

Все элементы требуемой для расчета функции **Pem(x,ψ)** квадратной матрицы **PxPsi** должны представлять собой значения электромагнитных сил в Н, причем в каждой строке должны стоять силы для неизменного перемещения, назначаемого элементами вектора **vx**, а в пределах каждого столбца — силы для неизменного потокосцепления, назначаемого элементами вектора **vψ**. Все преобразования и построения, которые ниже проводятся для электромагнитных сил, аналогичны сделанным для токов в предыдущем пункте документа. Отличие состоит в том, что если в п. 2.3 каждый столбец матрицы $\mathbf{mFlw}^T$ соответствовал одному-единственному вектор-столбцу токов $\mathbf{vi}^T$, то здесь каждый столбец той же самой матрицы $\mathbf{mFlw}^T$ соответствует своему столбцу матрицы $\mathbf{mPemx}^T$. Поэтому предварительная интерполяция осуществляется попарно: между столбцами матриц $\mathbf{mFlw}^T$ и $\mathbf{mPemx}^T$, имеющими одинаковые номера.

mPemx: = READPRN($\mathbf{Pemxu_{dat}}$).

mPemx =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	42.829	177 515	289 954	348.236	371.815	394 796	409.652	422.063
1	0	1.232	4.964	11.139	19.703	31.78	45.791	62.278	78.697
2	0	0 97	3.907	8 905	16 044	25 226	36.61	49.31	63.478
3	0	0.228	0 899	2 045	3 66	5.745	8.297	11.222	14.471
4	0	0 099	0 397	0.901	1 596	2 514	3.632	4.992	6.495

mPemx^T =

	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	42 829	1 232	0 97	0 228	0 099
2	177 515	4 964	3.907	0 899	0.397
3	289 954	11 139	8 905	2 045	0 901
4	348 236	19 703	16 044	3.66	1.596
5	371.815	31 78	25.226	5 745	2.514
6	394 796	45 791	36.61	8 297	3 632
7	409 652	62 278	49.31	11 222	4 992
8	422 063	78 697	63 478	14 471	6 495
9	433 72	97 505	79 849	18 94	8 239
10	444 546	118 846	95 129	23 326	10.241
11	479 062	167 425	146.093	44 232	19 89
12	508.504	197 221	174 837	64.415	31 091

$$vP := \left| \begin{array}{l} \text{for } n \in 0..N \\ \quad \left| \begin{array}{l} vsP \leftarrow \overrightarrow{\text{lspline}\left[\left(mFlw^T\right)^{<n>}, \left(mPemx^T\right)^{<n>}\right]} \\ vP_n \leftarrow \text{interp}\left[vsP, \left(mFlw^T\right)^{<n>}, \left(mPemx^T\right)^{<n>}, v\psi\right] \end{array} \right. \\ vP \end{array} \right.$$

$vP_0{}^T = (0\ \ 34.84\ \ 136.29\ \ 305.257\ \ 506.258)$;

$vP_N{}^T = (0\ \ 3.799\ \ 15.153\ \ 34.325\ \ 50.444)$;

$$PxPsi = \left| \begin{array}{l} P \leftarrow \text{stack}\left[\left(vP_N{}^T\right), vP_{N-1}{}^T\right] \\ \text{for } n \in N-2..0 \\ \quad P \leftarrow \text{stack}\left(P, vP_n{}^T\right) \\ P \end{array} \right.$$

$$vP = \begin{bmatrix} \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \\ \{5,1\} \end{bmatrix} \qquad vP_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 34.84 \\ 136.29 \\ 305.257 \\ 506.258 \end{bmatrix} \qquad vP_N = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.799 \\ 15.153 \\ 34.325 \\ 50.444 \end{bmatrix}$$

$$PxPsi = \begin{bmatrix} 0 & 3.799 & 15.153 & 34.325 & 50.444 \\ 0 & 6.373 & 25.504 & 58.501 & 95.054 \\ 0 & 12.935 & 51.894 & 117.627 & 214.627 \\ 0 & 14.146 & 56.562 & 127.843 & 235.679 \\ 0 & 34.84 & 136.29 & 305.257 & 506.258 \end{bmatrix}$$

Для построения на рис. 6 интерполяционных функций **P0(ψ)** для притянутого и **PN(ψ)** для отпущенного положений якоря рассчитаем сначала векторы вторых производных интерполяционных кривых:

$$vsP0:=cspline[(mFlw^T)^{\langle 0\rangle},(mPemx^T)^{\langle 0\rangle}];$$

$$vsPN:=cspline[(mFlw^T)^{\langle N\rangle},(mPemx^T)^{\langle N\rangle}],$$

а потом введем сами функции:

$$P0(\psi):=interp[vsP0,(mFlw^T)^{\langle 0\rangle},(mPemx^T)^{\langle 0\rangle},\psi];$$

$$PN(\psi):=interp[vsPN,(mFlw^T)^{\langle N\rangle},(mPemx^T)^{\langle N\rangle},\psi].$$

На рис. 6 показаны зависимости электромагнитных сил от потокосцеплений, аналогичные зависимостям токов от потокосцеплений на рис. 1. Для уменьшения ширины области переменных вдоль оси ординат рис. 6 использованы обозначения:

$$mPT0:=(mPemx^T)^{\langle 0\rangle};\quad mPTN:=(mPemx^T)^{\langle N\rangle}.$$

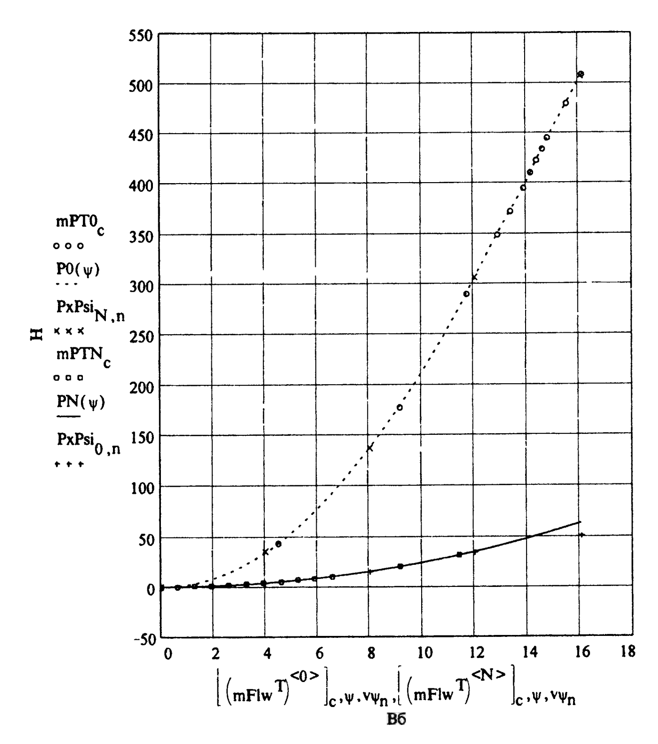


Рис. 6

Окончательная интерполяция

$sP:=cspline(x\psi, PxPsi);\quad P_{em}(x,\psi):=interp\left[sP, x\psi, PxPsi, \begin{pmatrix} x \\ \psi \end{pmatrix}\right];$

$Px\psi_{k,j}:=P_{em}(xind_k, yind_j).$

Переменные для уменьшения области аргументов вдоль оси абсцисс рис. 7:

$mFlwT0:=(mFlw^T)^{<0>};\quad mFlwTN:=(mFlw^T)^{<N>}.$

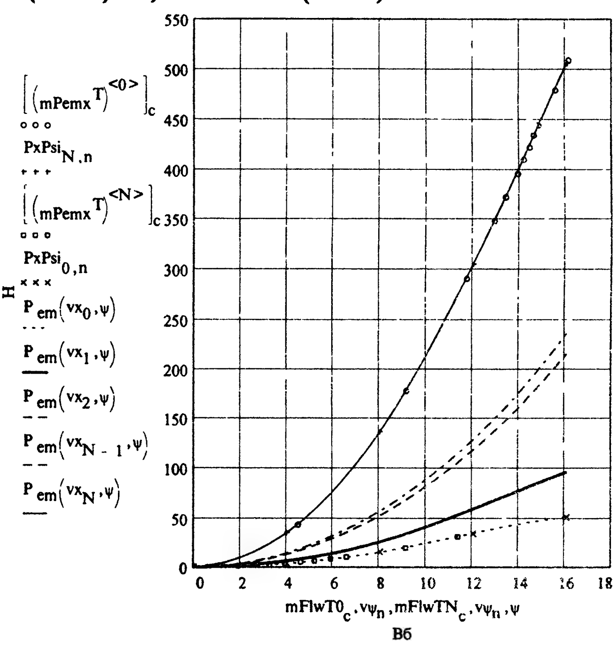


Рис. 7

Н
P em(x,vψ0)
P em(x,vψ1)
P em(x,vψ2)
P em(x,vψN-1)
P em(x,vψN)
600 500 400 300 200 100 0
0 2 4 6 8 10 12 14
x 1000
мм

Рис. 8

Построение параметрических кривых

На рис. 7 показаны кривые зависимостей электромагнитных сил от потокосцепления. Каждой кривой соответствует свое значение перемещения, которое выполняет роль параметра. На рис. 8 изображены зависимости сил от перемещения. Каждой кривой соответствует свое фиксированное значение потокосцепления, назначаемое вектором vψ и выполняющее роль параметра.

Построение трехмерных графиков

Матрица Pxψ изображена на рис. 9 в виде трехмерной поверхности, а на рис. 10 — в виде карты линий уровня.

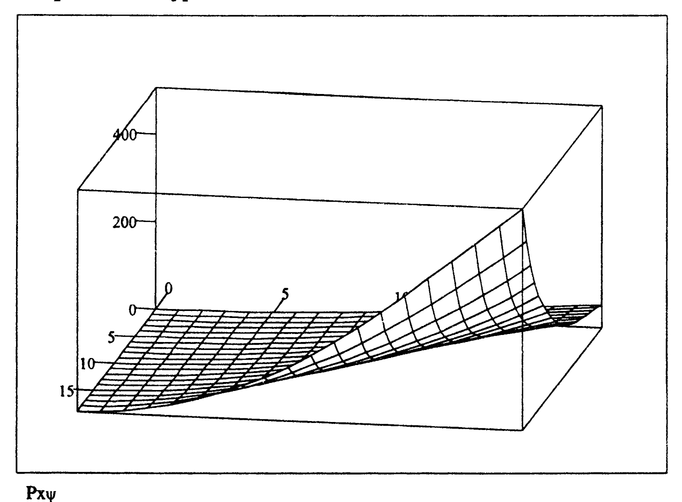


Рис. 9

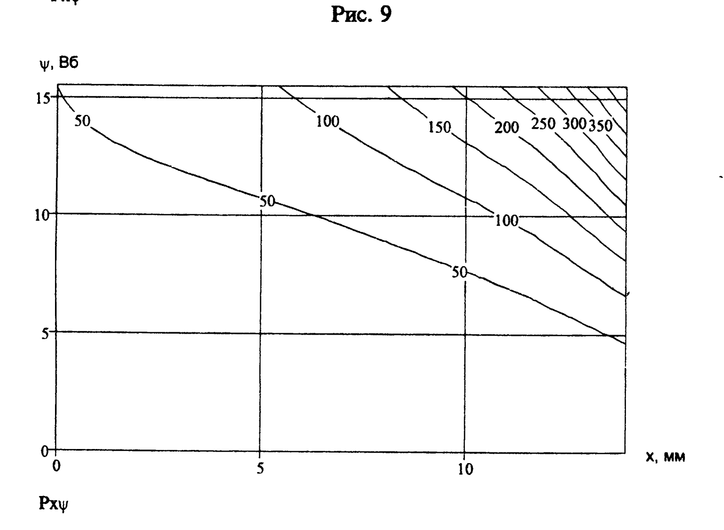


Рис. 10

2.5. Зависимость силы веса якоря от его положения

Из геометрических соображений следует, что сила веса якоря, приведенная к оси сердечника, зависит от перемещения якоря x:

$$P_m(x) := Pm \cdot \cos\left(\frac{\Delta x - x}{R2}\right).$$

2.6. Ввод значений статических тяговых и механических сил

Значения статических тяговых сил **Pemst** расположены в левом столбце структурированного файла **Pu.dat**, а значения статических механических сил **Pmhst** — в его правом столбце. Номер строки соответствует порядковому номеру положения якоря при нумерации, принятой в настоящем рабочем документе. Значения элементов файла **Pu.dat** с помощью функции READPRN сначала присваиваются элементам матрицы **P**, а потом выделяются в отдельные векторы: статические тяговые — в вектор **Pemst**, статические механические — в вектор **Pmhst**

$$P := READPRN(Pu_{dat}); \quad Pemst := P^{<0>}; \quad Pmhst := P^{<1>};$$

$$P := READPRN\left(Pu_{dat}\right);$$

$$Pemst := P^{<0>}; \quad Pmhst := P^{<1>}; \quad Pemst = \begin{bmatrix} 29.868 \\ 62.381 \\ 172.656 \\ 194.812 \\ 506.221 \end{bmatrix}; \quad Pmhst = \begin{bmatrix} 8 \\ 29 \\ 50 \\ 120 \\ 200 \end{bmatrix}; \quad P = \begin{bmatrix} 29.868 & 8 \\ 62.381 & 29 \\ 172.656 & 50 \\ 194.812 & 120 \\ 506.221 & 200 \end{bmatrix}.$$

На рис. 11 показаны исходные статические тяговая (сплошная) и механическая (штриховая) характеристики, построенные по данным файла **Pu.dat**. Механическая характеристика рис. 11 достаточно типична для контактных аппаратов. Она состоит из характеристик двух предварительно сжатых (или изогнутых) пружин — возвратной, действующей на всей длине хода якоря, и контактной, добавляющейся к возвратной в нашем случае в диапазоне изменения x примерно от $\Delta x \cdot 2/3$ до Δx. Для механических характеристик с предварительно сжатыми витыми пружинами в местах включения этих пружин в работу характерны вертикальные участки, которые фактически означают бесконечно большую жесткость, что приводит к перегрузке компьютера. Такие участки необходимо заменять участками с большой, но конечной жесткостью. В п. 2.7 показано, как добавить такие участки в начале и в конце исходной механической характеристики. Из рис. 11 следует, что в такой коррекции района

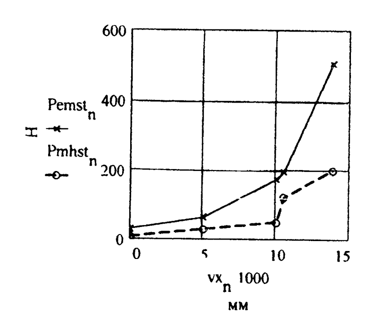


Рис. 11

подключения контактной пружины к возвратной в нашем случае нет необходимости, так как на этом участке (при перемещениях от vx_2 до vx_3) статическая механическая характеристика имеет конечную жесткость.

Как видно из рис. 11, в исходной QB-программе DU статическая тяговая характеристика — ломаная линия (рассчитанные при N+1 положениях якоря электромагнитные силы соединены прямыми). Здесь проводится ее сплайн-интерполяция (точки соединяются плавной кривой, составленной из нескольких кубических полиномов):

$$vsP:=lspline(vx,Pemst); \quad P_{emst}(x):=interp(vsP,vx,Pemst,x).$$

В виде зависимости силы от длины рабочего немагнитного зазора тяговая характеристика, построенная по этой интерполяционной функции, показана на рис. 35 штрих-пунктирной линией.

2.7. Корректировка статической механической характеристики

Дополнительно вводятся два почти вертикальных участка — один в начале хода якоря (начиная с x=0, при x, чуть больших нуля), другой в его конце (при x, чуть меньших Δx). Первый моделирует упор, ограничивающий движение якоря в сторону увеличения немагнитного зазора, второй — ограничение хода якоря после его удара по полюсному наконечнику. Поэтому дискретных значений перемещений **xj** и механических сил **Pmh1** стало на две единицы больше (стало N+3=7), чем рассмотренных выше элементов векторов перемещений **vx** и потокосцеплений **vψ**, строк (и столбцов) квадратных матриц токов **ixPsi** и электромагнитных сил **PxPsi**, элементов вектора статических электромагнитных сил **Pemst** и исходного вектора **Pmhst** механических сил. Всех перечисленных, кроме **xj** и **Pmh1**,— по N+1=5. Тангенсы углов наклона этих участков к оси перемещений (жесткости эквивалентных пружин) приняты равными c_{jo} (для пары якорь — опора якоря) и c_{jp} (для пары якорь — полюсный наконечник).

Сформируем векторы для построения новой статической механической характеристики.

Две верхних точки нового вектора новой механической характеристики имеют координаты перемещений

$$xb:=\begin{pmatrix} 0 \\ \dfrac{Pmhst_0}{c_{jo}} \end{pmatrix}$$

и сил

$$Pmhb:=\begin{pmatrix} 0 \\ Pmhst_0 \end{pmatrix}.$$

Две нижних точки нового вектора новой механической характеристики имеют координаты перемещений

$$xn:=\begin{bmatrix} \Delta x-\dfrac{Pemst_N-Pmhst_N}{c_{jp}} \\ \Delta x+\dfrac{Pemst_N}{c_{jp}} \end{bmatrix}$$

и сил

$$Pmhb:=\begin{pmatrix} Pmhst_N \\ 2\cdot Pemst_N \end{pmatrix}.$$

Избавляемся от первого (с номером 0) и N+1-го (с номером N) элементов старого вектора перемещений **vx**:

vxm: = submatrix(vx,1,N − 1,0,0).

При этом получаем промежуточный вектор перемещений (в мм):

$$vxm\cdot 1000=\begin{pmatrix} 5.032 \\ 10.065 \\ 10.56 \end{pmatrix}.$$

Новый вектор перемещений создаем путем объединения двух элементов вектора **xb** (устанавливаем их над вектором **vxm**)

xj: = stack(xb,vxm)

и двух элементов вектора **xn** (устанавливаем их под вектором **xj**)

xj: = stack(xj,xn).

Новый вектор перемещений (в мм)

$$xj\cdot 1000=\begin{bmatrix} 0 \\ 0.008 \\ 5.032 \\ 10.065 \\ 10.56 \\ 13.884 \\ 13.966 \end{bmatrix}.$$

Чтобы сформировать вектор **Pmh1**, избавимся от первого (с номером 0) и N+1-го (с номером N) элементов вектора **Pmhst**:

Pmhm: = submatrix(Pmhst,1,N − 1,0,0);

$$Pmhm=\begin{pmatrix} 29 \\ 50 \\ 120 \end{pmatrix}.$$

Новый вектор механических сил после установки двух элементов вектора **Pmhb** над вектором **Pmhm**:

Pmh1: = stack(Pmhb,Pmhm).

Окончательно новый вектор механических сил получим, если под этот вектор добавим два элемента вектора **Pmhn**:

Pmh1: = stack(Pmh1,Pmhn);

$$Pmh1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 8 \\ 29 \\ 50 \\ 120 \\ 200 \\ 1.012 \cdot 10^3 \end{bmatrix}.$$

Присвоим функции $P_{mh1}(x)$, по которой для любого перемещения x можно определить составляющую механической силы, зависящую только от перемещения, значение функции, осуществляющей линейную аппроксимацию этой составляющей механической характеристики:

$P_{mh1}(x) := \text{linterp}(xj, Pmh1, x)$.

На рис. 12 полученная функция построена в диапазоне изменения перемещений

$x := 0, 0.01 \cdot xj_{N+2} .. 1.01 \cdot xj_{N+2}$;

из него видно, что при перемещениях, близких к максимальному, механическая характеристика поднимается почти вертикально, но все же с конечной жесткостью. Участок характеристики для перемещений, близких к нулю (немагнитный зазор близок к максимальному), в большем, чем на рис. 12, маштабе показан на рис. 36 точечной линией. Его конечная жесткость на этом рисунке выглядит достаточно убедительно.

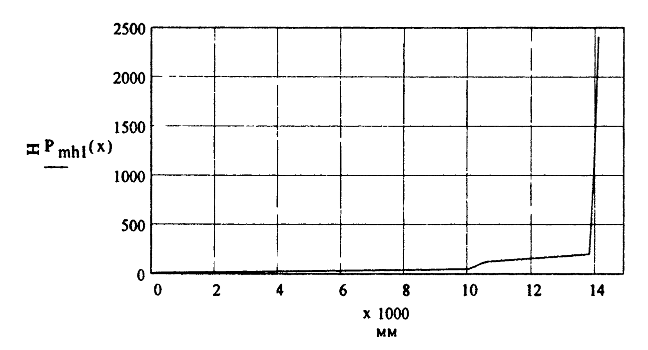


Рис. 12

Проверка, которая показывает, что введенная функция обеспечивает также и линейную экстраполяцию:

$P_{mh1}(-0.01) = -1 \cdot 10^4$; $P_{mh1}(0.015) = 1.136 \cdot 10^4$.

2.8. Вязкая составляющая механической характеристики, зависящая от перемещения и скорости якоря

Предполагается, что демпфирование возникает, главным образом, из-за пластической деформации материала якоря, полюсного наконечника и опоры якоря при их соударении. Предполагается также, что пластическая деформация при ударах происходит только при прямом направлении движения, т. е. если перемещение $x > \Delta x$, то при скорости $v > 0$ (учитывается с помощью эквивалентного коэффициента демпфирования d_{ip}) и если $x < 0$, то только при $v < 0$ (учитывается с помощью эквивалентного коэффициента демпфирования d_{io}). В формулах **Pdjo(x,v)** и **Pdjp(x,v)** составляющих суммарного демпфирующего усилия выражения $(v<0)$ и $(v>0)$ с булевыми операторами $<$ и $>$ возвращают 1, если выполняются, и 0, если не выполняются.

Демпфирующее усилие при ударах якоря по опоре якоря:

$$Pdjo(x,v) := if[x < xj_1, d_{jo} \cdot v \cdot (v<0), 0].$$

Демпфирующее усилие при движении якоря, не соприкасающегося с полюсным наконечником и опорой якоря:

$$Pd(x,v) := if(xj_1 \leqslant x < xj_{N+1}, d \cdot v, 0).$$

Демпфирующее усилие при ударах якоря по полюсному наконечнику:

$$Pdjp(x,v) := if[x > xj_{N+1}, d_{jp} \cdot v \cdot (v>0), 0].$$

Суммарное демпфирующее усилие:

$$P_{mh2}(x,v) := Pdjo(x,v) + Pd(x,v) + Pdjp(x,v).$$

Диапазон изменения перемещений для рис. 13:

$$x := -0.0049, -0.0048..0.0179.$$

На рис. 13 показаны зависимости демпфирующего усилия от перемещения. Каждая характеристика соответствует своему значению скорости, выступающей в качестве параметра. На рис. 14 в качестве параметра используется перемещение, а по оси абсцисс отложена скорость.

Диапазон изменения скорости на рис. 14 и 15:

$$v := -1, -0.999..0.999.$$

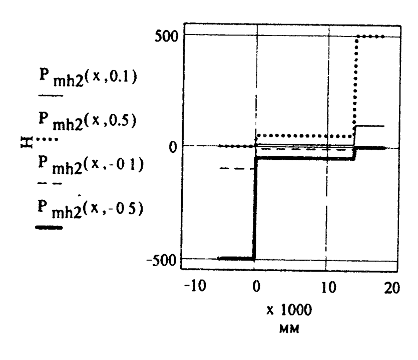


Рис. 13

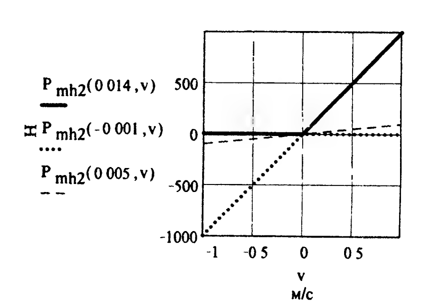


Рис. 14

Рис. 13 и 14 показывают, что при срабатывании электромагнита после удара якоря по сердечнику или полюсному наконечнику возникает противодействующая сила, пропорциональная скорости якоря. При возврате якоря в исходное положение после удара якоря по ограничителю его хода в сторону увеличения немагнитного зазора тоже возникает сила, направленная против увеличения этого зазора.

2.9. Сила сухого трения

Будем полагать, что зависимость силы сухого трения от скорости состоит из трех прямолинейных участков. При скоростях **v**, близких к нулю (в диапазоне $-\mathbf{v0} < \mathbf{v} < \mathbf{v0}$), сила сухого трения сильно зависит от скорости и изменяется от $-\mathbf{P_c}$ до $+\mathbf{P_c}$ с жесткостью $\mathbf{c_c}$. Считаем, что при $\mathbf{v} >= \mathbf{v0}$ и при $\mathbf{v} <= -\mathbf{v0}$ сила сухого трения не зависит от перемещения x и модуля скорости, но зависит от знака скорости, так как она всегда направлена в сторону, противоположную направлению движения. Зависимость в этом диапазоне скоростей легко выразить с помощью булевых операторов аналогично тому, как это было сделано для $\mathbf{P_{mh2}(x,v)}$ в п. 2.8.

Абсцисса излома зависимости силы сухого трения от скорости на ее положительной полуоси:

$$v0 := \frac{P_c}{c_c}.$$

Составляющая при прямом направлении движения, при котором скорость $\mathbf{v} > \mathbf{v0}$:

$$P1(v) := \text{if}[v \geqslant v0, P_c \cdot (v > 0), 0].$$

При обратном направлении движения (для $\mathbf{v} \leqslant -\mathbf{v0}$):

$$P2(v) := \text{if}[v \leqslant -v0, -P_c \cdot (v < 0), 0].$$

Составляющая особого участка:

$$P3(v) := \text{if}(-v0 < v < v0, v \cdot c_c, 0).$$

Суммарная:

$$P_{mh3}(v) := P1(v) + P2(v) + P3(v).$$

Попытка ограничиться составляющими **P1(v)** и **P2(v)** при $\mathbf{v0} = 0$ приводит к перегрузке компьютера, так как реально это означает предположение о бесконечно большой жесткости характеристики $\mathbf{P_{mh3}(v)}$ при $\mathbf{v} = 0$.

На рис. 15 показана зависимость силы сухого трения от скорости в районе $\mathbf{v} = 0$.

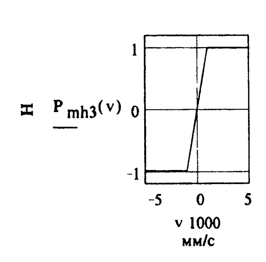


Рис. 15

3. Решение системы из трех дифференциальных уравнений (см. п. 1)

Вектор начальных значений искомых величин:

$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

т. е. $y_0 = \psi(0)$; $y_1 = x(0)$; $y_2 = v(0)$.

Функция, содержащая первые производные искомых величин (ψ, **x**, **v**) для их начальных значений:

$$D(t,y) := \begin{bmatrix} U - i(y_1, y_0) \cdot R_\theta \\ y_2 \\ \dfrac{P_{em}(y_1, y_0) + P_m(y_1) - P_{mh1}(y_1) - P_{mh2}(y_1, y_2) - P_{mh3}(y_2)}{M} \end{bmatrix}.$$

Вычисление решения на отрезке 0 — 0.199 (второй и третий аргументы функции **Rkadapt**) в 1000 точках (четвертый аргумент этой функции — предельное значение дискретной переменной **q**) осуществляется с помощью встроенной в MCAD функции, решающей систему обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутта с шагом, адаптирующимся к особенностям расчета:

Z: = Rkadapt(y,0,0.199,1000,D); q: = 0..1000.

В получаемой в результате этого расчета матрице **Z** в первом столбце заключены моменты времени **t**, для которых рассчитаны потокосцепления ψ (второй столбец), перемещения **x** (третий столбец) и скорости **v** (четвертый столбец). Иными словами, в полученной матрице первый столбец — вектор независимой переменной; второй, третий и четвертый столбцы — векторы искомых зависимых переменных, расположенные в том порядке, в каком они были расположены в векторе **y** их начальных значений:

$t := Z^{<0>}$; $\psi := Z^{<1>}$; $x := Z^{<2>}$; $v := Z^{<3>}$.

На рис. 16 — 22 векторы ψ, **x** и **v** отображены в функции вектора **t** для каждого значения дискретной переменной **q**. Для построения на рис. 17 кривой изменения во времени длины основного рабочего зазора δ электромагнита (между якорем и полюсным наконечником) использована формула:

$\delta_q := \Delta x + \delta_{min} - x_q$.

На рис. 18 показано изменение перемещения якоря x от момента подключения обмотки на напряжение (t=0) до момента t=0,04 с. Из рисунка видно, что якорь начинает движение с самого начала (с момента t=0), но практически можно считать началом движения момент t=0,03 с, при котором перемещение начинает резко расти. Рис. 18 хорошо согласуется с изменением скорости якоря за этот промежуток времени, показанном на рис. 20 и 21.

На рис. 19 показано изменение длины рабочего немагнитного зазора в конце движения якоря. Первое соприкосновение якоря с полюсным наконечником происходит в момент времени t=0,117 с и сопровождается небольшой быстро затухающей вибрацией. Амплитуда первого пика вибрации составляет примерно 0,3 мм. Рис. 19 хорошо согласуется с рис. 22, на котором примерно для того же промежутка времени показана кривая изменения скорости якоря.

Небольшой провал между двумя самыми высокими бросками скорости (рис. 20 и 22) объясняется уменьшением суммарной движущей силы в те моменты времени, в течение которых пологая часть механической характеристики переходит в круто возрастающую часть за счет включения в работу предварительно сжатой контактной пружины. По рис. 34 эти моменты времени лежат в районе 0,11 с, а по рис. 35 они соответствуют зазорам δ чуть больше 3 мм, при которых движущая сила $\mathbf{P_{emm}}(x,\psi)$

В6

Рис. 16

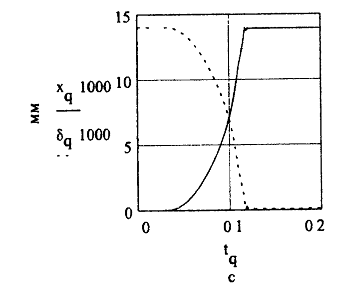


Рис. 17

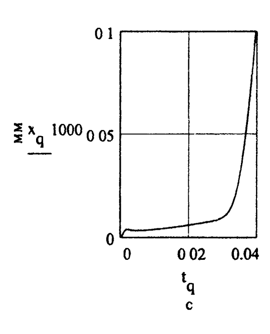


Рис. 18

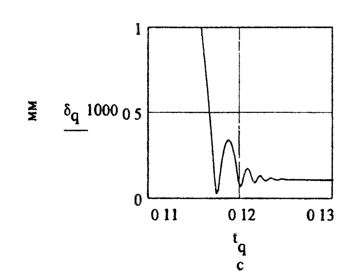


Рис. 19

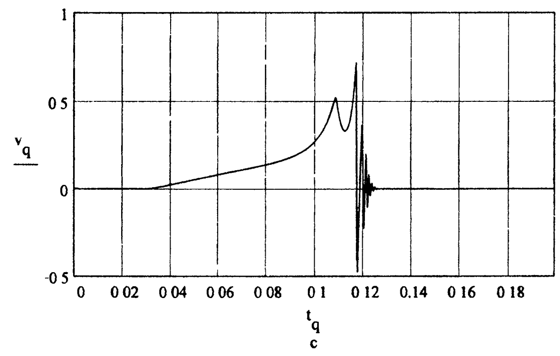


Рис. 20

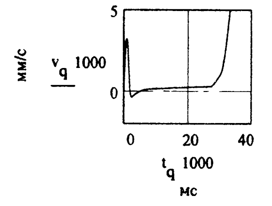


Рис. 21

Рис. 22

(электромагнитная с учетом веса якоря) и статическая механическая сила $P_{mh1}(x)$ близко подходят друг к другу. Рис. 24 и 27 показывают, что начиная с момента второго пика скорости (t=0,117 с) основной силой сопротивления движению становятся как статическая механическая $P_{mh1}(x)$ (рис. 24), так и вязкая составляющая $P_{mh2}(x,v)$ (рис. 27 и 28). Последняя — из-за большой скорости разогнавшегося к этому моменту якоря. На короткое время в районе t=0,12 с суммарная сила $P_{\Sigma}(t1)$ (жирная сплошная линия на рис. 34) пытается даже вернуть якорь в исходное положение (отрицательна). После нескольких колебаний якоря, которые эффективно гасятся за счет вязкого и сухого трения, основной силой сопротивления движению становится упругая составляющая $P_{mh1}(x)$ (статическая механическая характеристика) за счет большой жесткости c_{jp} эквивалентной пружины, заменяющей пару якорь — полюсный наконечник. Вся система успокаивается при перемещении $x=\Delta x$, что соответствует минимальной длине δ_{min} рабочего зазора электромагнита.

На рис. 23 показана кривая зависимости введенной в п. 2.3 функции тока от времени.

Установившийся ток

$$i_y := \frac{U}{R_\theta}.$$

Расчет дает

$$i_y = 0.312.$$

Сила механизма, направленная навстречу полезным силам (противодействующая), равна сумме упругой составляющей $P_{mh1}(x)$ и сил вязкого $P_{mh2}(x,v)$ и сухого $P_{mh3}(v)$ трения:

$$P_{mh}(x,v) := P_{mh1}(x) + P_{mh2}(x,v) + P_{mh3}(v).$$

На рис. 24 — 26 показано изменение во времени ее упругой составляющей, на рис. 27 — 28 — вязкой, а на рис. 29 — 30 — составляющей, создаваемой силами сухого трения. На рис. 31 все эти силы изображены на одном графике, включая суммарную противодействующую силу $P_{mh}(x,v)$.

Зависимости сил сухого трения $P_{mh3}(v)$ от времени (рис. 29 — 30) находятся в хорошем соответствии с зависимостями от времени перемещения x (рис. 17 — 18) и скорости v (рис. 20 — 22). Так, в самом начале процесса за время от t=0 до t=2 мс происходит движение якоря в прямом направлении под действием силы его веса. Это отмечается небольшим всплеском x на рис. 18, заметным броском скорости v на

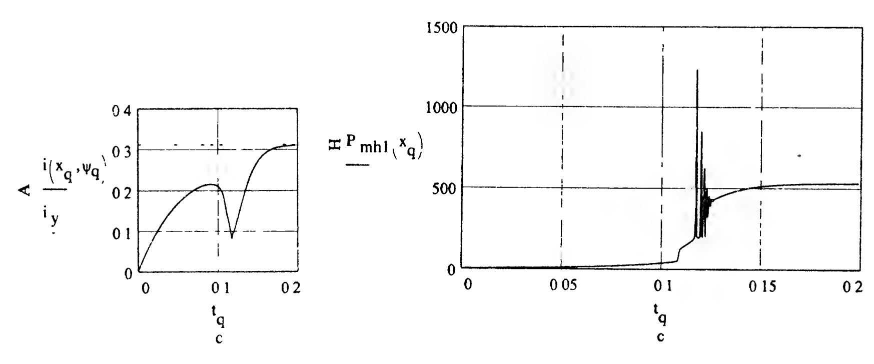
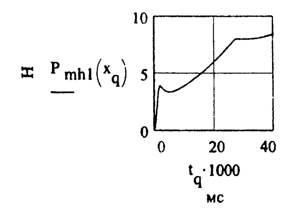


Рис. 23 Рис. 24



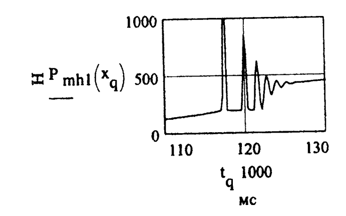


Рис. 25 Рис. 26

рис. 21 и наличием силы сухого трения на рис. 29. Далее на протяжении следующих примерно 25 мс якорь практически стоит на месте, так как нарастание движущей силы полностью компенсируется ростом упругого сопротивления предварительно сжатой (изогнутой) возвратной пружины, действие которой при отсутствии тока в катушке компенсировалось упругой деформацией опоры якоря. Нагрузка с опоры якоря переключается за это время отсутствия движения на электромагнитную силу, а опора якоря разгружается. Сила сухого трения сопровождает движение якоря в прямом направлении вплоть до момента первого соприкосновения якоря с полюсным наконечником, которое по рис. 29 и 30 происходит при $t = 117$ мс. Вибрация при ударе якоря по полюсному наконечнику продолжается примерно 10 мс (в диапазоне от 117 до 127 мс — см. рис. 30).

Сила, стремящаяся уменьшить длину рабочего немагнитного зазора (движущая), совершает полезную работу. Она равна сумме электромагнитной $P_{em}(x,\psi)$ и силы веса якоря $P_m(x)$:

$$P_{emm}(x,\psi) := P_{em}(x,\psi) + P_m(x).$$

Зависимости всех этих сил от времени показаны на рис. 32 — 33.

Суммарная сила $P_\Sigma(t1)$, под действием которой движется якорь, равна разности между движущей силой $P_{emm}(x,\psi)$, стремящейся уменьшить длину рабочего зазора, и противодействующей силой $P_{mh}(x,v)$ механизма, сопротивляющейся движению в этом направлении. С другой стороны, $P_\Sigma = M \cdot a$, где M — масса движущихся частей, a — ускорение $a = dv/dt$. MCAD может дифференцировать только функцию, но не вектор. Для расчета dv/dt проведем сплайн-интерполяцию вектора значений скорости.

Получим функцию зависимости скорости от времени, где аргумент t1 — дискретная переменная, диапазон изменения которой сделаем таким же, как диапазон изменения t:

t1: = 0,0.001..0.199; sv: = cspline(t,v); fv(t1): = interp(sv,t,v,t1).

Численное дифференцирование функции скорости позволяет рассчитать и построить на рис. 34 функцию зависимости суммарной силы от времени:

$$P_\Sigma(t1) := \left(\frac{d}{dt1} fv(t1)\right) \cdot M.$$

Кроме $P_\Sigma(t1)$ (жирная кривая) на этом рисунке построены также движущая сила $Pemm(x,\psi)$ (жирные точки) и противодействующая $P_{mh}(x,v)$ (тонкая сплошная). Следует обратить внимание на то, что по оси ординат отложено отрицательное значение $P_{mh}(x,v)$, поэтому $P_\Sigma(t1)$ на этом графике определяется путем суммирования кривых $P_{emm}(x,\psi)$ и $-P_{mh}(x,v)$.

Значения длины зазора электромагнита в исходном положении якоря $\delta_0 = 0.014$ и в конце его хода

$$\delta_{950} = 9.751 \cdot 10^{-5};\ \delta_{999} = 9.746 \cdot 10^{-5};\ \delta_{1000} = 9.746\ 10^{-5}.$$

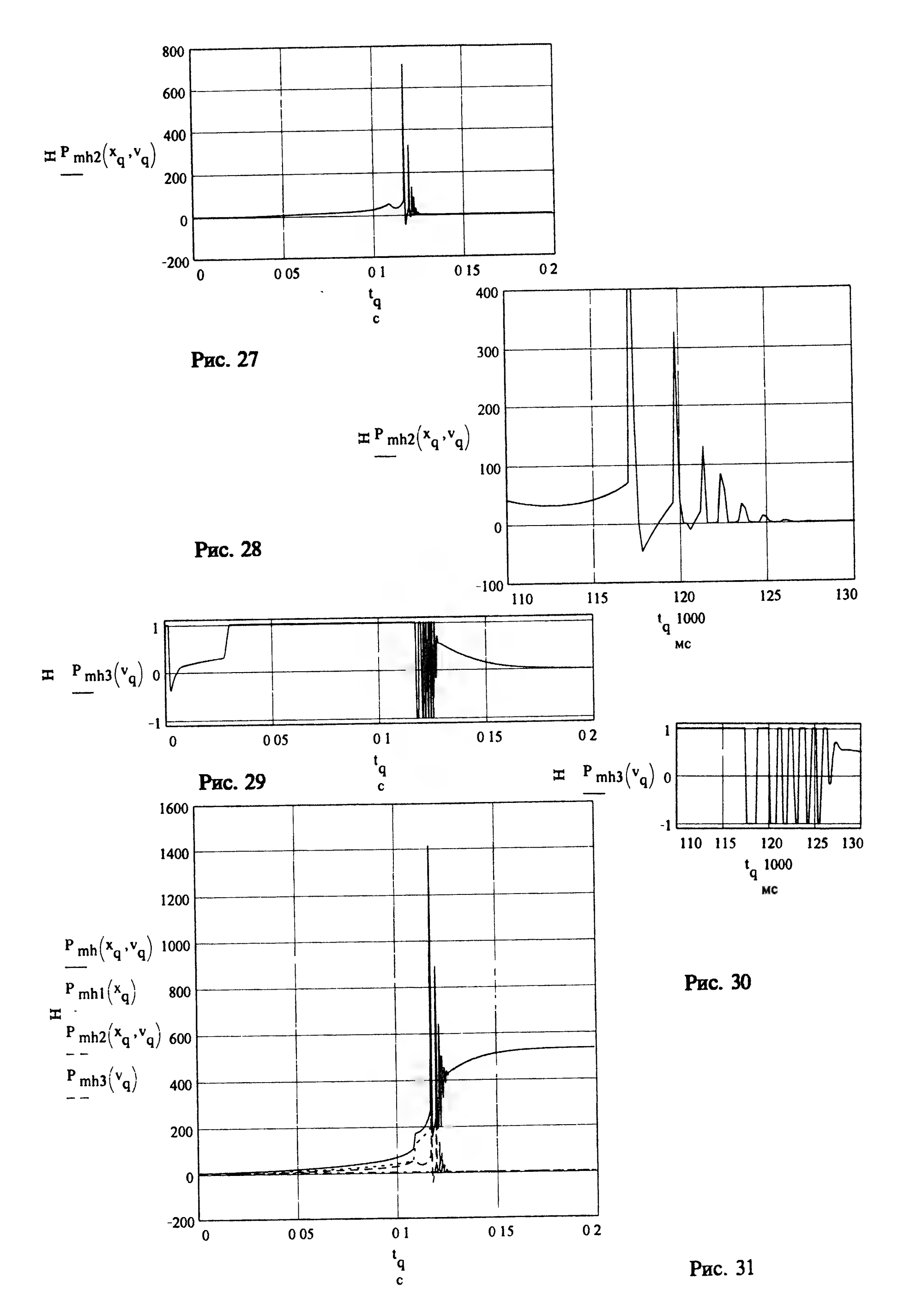


Рис. 27

Рис. 28

Рис. 29

Рис. 30

Рис. 31

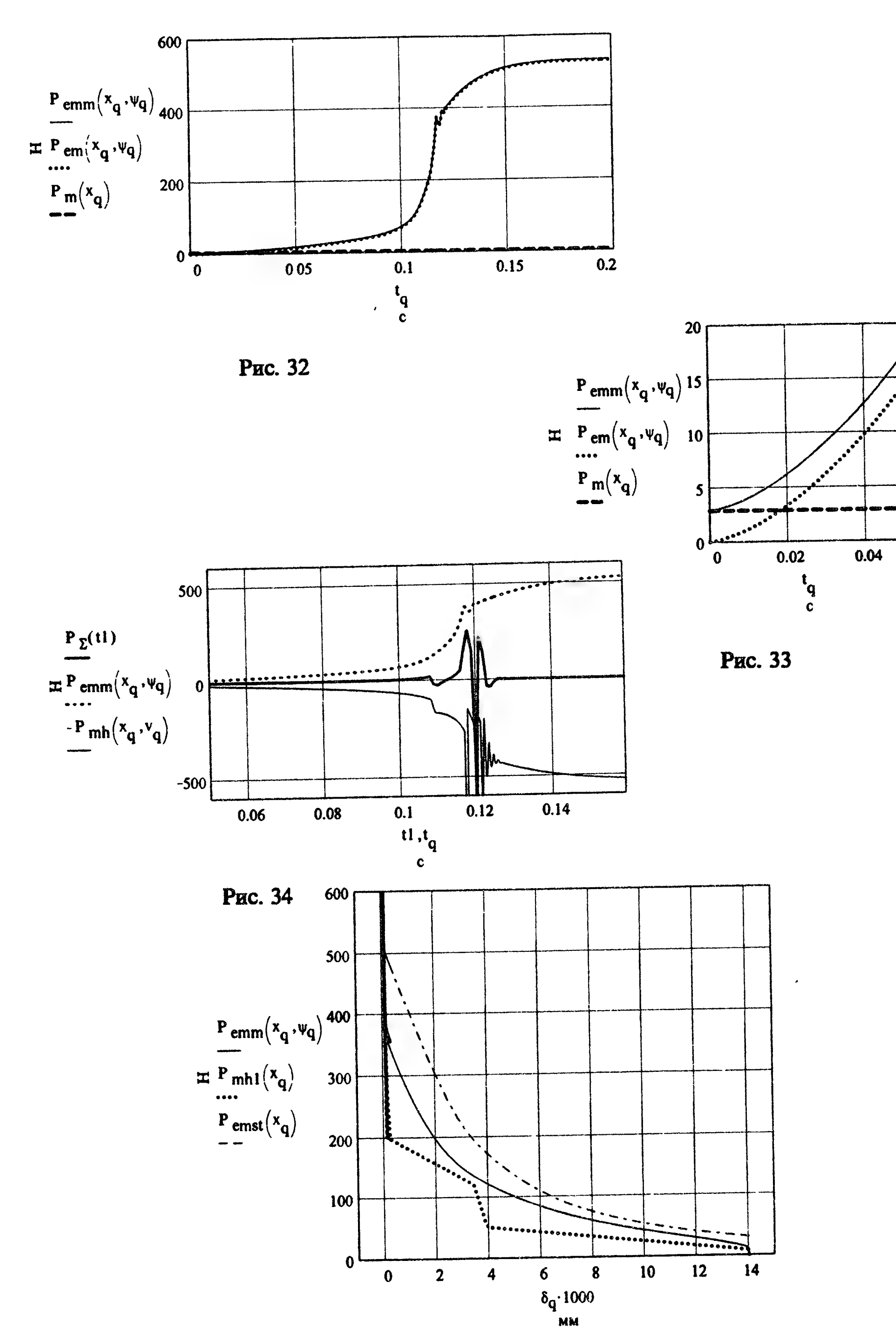


Рис. 32

Рис. 33

Рис. 34

Рис. 35

На рис. 35 в виде зависимости от длины рабочего зазора электромагнита изображены наиболее интересные характеристики: тяговая статическая $P_{emst}(x)$ (штрих-пунктир), тяговая динамическая $P_{emm}(x,\psi)$ с учетом веса якоря (сплошная) и статическая механическая $P_{mh1}(x)$ (из жирных точек). На рис. 36 две последние в районе максимального зазора повторены. Как видно из рис. 36, тяговая динамическая сила $P_{emm}(x,\psi)$ становится больше статической механической $P_{mh1}(x)$ только после преодоления крутого участка последней, соответствующего предварительному сжатию возвратной пружины.

Напряжение на активном сопротивлении обмотки

$$iR_q := i(x_q, \psi_q) \cdot R_\theta.$$

На рис. 37 показана кривая изменения во времени напряжения самоиндукции $d\psi/dt = U - i \cdot R_\theta$. В обозначениях рабочего документа это напряжение:

$$U_\psi := U - iR.$$

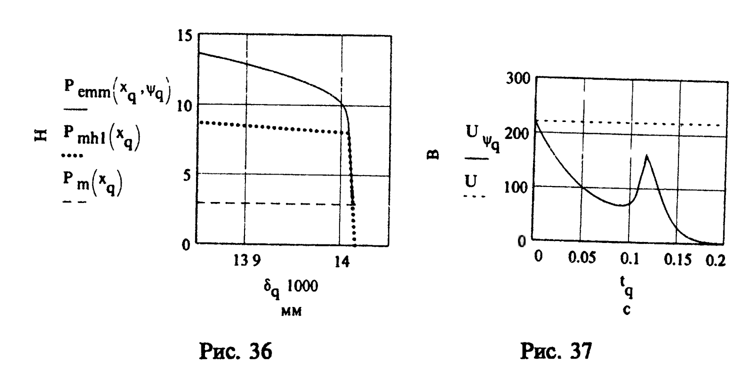


Рис. 36 Рис. 37

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

ФАЙЛЫ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГРАММЫ G&G

```
ab1.dat     0  30  60  90  120  150  270

par1.dat    10.065

or1.dat
 0  2.207386  4.47679  6.75997  8.88818  10.86586  14.47855

ab2.dat     0  5.0325  10.065  10.56  13.915

par2.dat    1  2

or2.dat     29.86848  62.38066  172.6565  194.8117  506.2209
            8  29  50  120  200

ab3.dat
 0  15  30  45  60  75  90  105  120  135  150  210  270

par3.dat    0  10.065  13.915
```

```
or3.dat
 0  4.506154  9.174752  11.75602  12.92159  13.43284  13.92068  _
14.20369  14.43102  14.64286  14.84973  15.56603  16.12182
 0  1.09931  2.207386  3.334779  4.47679  5.611622  6.75997  _
7.839136  8.88818  9.968342  10.86586  13.35375  14.47855
 0  .6489719  1.298319  1.957111  2.602735  3.26955  3.930406  _
4.611332  5.25645  5.920018  6.602465  9.189694  11.43946


abt.dat      0  10.065  13.915

part.dat     0  30  60  90  120  150  270

ort.dat
 0  9.174752  12.92159  13.92068  14.43102  14.84973  16.12182
 0  2.207386  4.47679  6.75997  8.88818  10.86586  14.47855
 0  1.298319  2.602735  3.930406  5.25645  6.602465  11.43946
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

ЛИСТИНГИ ФАЙЛОВ ПРОГРАММЫ G&G

G&G.MAK

```
MAINGG.FRM
C:\WINDOWS\SYSTEM\GRAPH.VBX
C:\WINDOWS\SYSTEM\GRID.VBX
GG.BAS
C:\WINDOWS\SYSTEM\CMDIALOG.VBX
C:\WINDOWS\SYSTEM\MSOLE2.VBX
BPSGR.FRM
HLP1.FRM
OLEGR.FRM
HLP2.FRM
GRD.FRM
HLP3.FRM
HLP4.FRM
HLP5.FRM
. . . . . . . . . . . . . .
```

MAINGG.FRM

```
Dim m As String 'объявление целочисленной переменной m на уровне модуля

Sub AbscFl () 'присвоение элементам массива Absc(Nc) значений из файла данных #1
  Nc = 0
  Do While Not EOF(1)
    Nc = Nc + 1: ReDim Preserve Absc(Nc) As Single: Input #1, Absc(Nc)
  Loop
  c = Nc
End Sub

Sub chkTranspose_Click () 'присвоение переменной t значений в зависимисти от
  'состояния флажка, который показывает допустимый порядок следования трех
  'исходных файлов данных в одном комплекте (см. Помощь1)
  If chkTranspose.Value = 1 Then
    t = 1: chkTranspose.Caption = "Матрица транспонирована"
  Else
    t = 0: chkTranspose.Caption = "Матрица не транспонирована"
  End If
End Sub

Sub cmdEnd_Click () 'конец работы программы
  End
End Sub
```

```
Sub cmdHelp_Click () 'справка о работе с программой
  Load frmHLP1: frmHLP1.Show 1
End Sub

Sub cmdOpen3Dialog_Click () 'трехкратный вывод на экран
  'стандартного окна диалога 'Открыть' (Open)

  OpenFileDat frmMAINGG: Open FileNameDat For Input As #1: AbscFl: Close #1
  OpenFileDat frmMAINGG: Open FileNameDat For Input As #1: ParFl: Close #1
  OpenFileDat frmMAINGG: Open FileNameDat For Input As #1: OrFl: Close #1
  VID 'процедура модуля GG.BAS для присвоения текстовым полям, заполненным над
  'таблицей полужирным шрифтом, и меткам, заполненным там же обычным шрифтом,
  ' эталонных вспомогательных исходных данных
End Sub

Sub cmdPrint_Click () 'печать принтером формы во время исполнения программы
  PrintForm
End Sub

Sub cmdSaveVID_Click () 'запись в файл вспомогательных исходных
  'данных, показанных полужирным шрифтом над таблицей данных
  VariableText: SaveFileDat frmMAINGG
  Open FileNameDat For Output As #1
    Write #1, AbscissaTxt, Abscissa, AbscissaDim
    Write #1, ParametrTxt, Parametr, ParametrDim
    Write #1, OrdinataTxt, Ordinata, OrdinataDim
  Close #1
End Sub

Sub cmdTabl_Click () 'вывод на экран формы с таблицей, заполненной данными
  Load frmGRD: GridDesign: frmGRD.Show 1
End Sub

Sub FileDat () 'открытие файла данных с именем, указанным в этой процедуре
  '(m выбирается в процедурах opt1, opt2, opt3, optt этого модуля)
  Open "ab" + m + ".dat" For Input As #1
    AbscFl 'присвоение значений этого файла данных элементам
    'массива Absc(Nc) (см. выше в этом модуле)
  Close #1
  Open "par" + m + ".dat" For Input As #1: ParFl: Close #1
  Open "or" + m + ".dat" For Input As #1: OrFl: Close #1
  'Все переключатели ввода вспомогательных исходных данных переводятся в
  'неактивное состояние, чтобы при повторной (без выхода из программы) загрузке
  'новых основных исходных данных была также возможность ввести и
    'новые вспомогательные исходные данные:
  optKeyVID.Value = 0: optUserVID.Value = 0: optVIDdat.Value = 0
  'То же делаем и с переключателями 'новый' и 'по умолчанию'
  'формы 'Таблица данных' внутри рамки 'MSGraph':
  frmGRD.optNew.Value = 0: frmGRD.optDefault.Value = 0
  Unload frmOLEGR 'форма frmOLEGR выгружается с тем, чтобы можно
  'было построить новый график MSGraph, не выходя из программы.
  VID 'процедура модуля GG.BAS для присвоения текстовым полям, заполненным над
  'таблицей полужирным шрифтом, и меткам, заполненным там же обычным шрифтом,
  'эталонных вспомогательных исходных данных
End Sub

Sub InputVID () 'ввод вспомогательных исходных данных и присвоение их
  'значений переменным, объявленным глобально в модуле GG.BAS
  Open FileNameDat For Input As #1
    Input #1, AbscissaTxt, Abscissa, AbscissaDim
    Input #1, ParametrTxt, Parametr, ParametrDim
    Input #1, OrdinataTxt, Ordinata, OrdinataDim
  Close #1
  TextVariable
End Sub

Sub opt1_Click () 'процедура переключателя 'ab1.dat, par1.dat,
```

```
  'or1.dat' для указания комплекта 1 исходных данных
  m = "1": FileDat
End Sub

Sub opt2_Click () 'процедура переключателя 'ab2.dat, par2.dat,
  'or2.dat' для указания комплекта 2 исходных данных
  m = "2"  FileDat
End Sub

Sub opt3_Click () 'процедура переключателя 'ab3.dat, par3.dat,
  'or3.dat' для указания комплекта 1 исходных данных
  m = "3": FileDat
End Sub

Sub optKeyVID_Click () 'процедура переключателя 'с клавиатуры' для ввода
  'вспомогательных исходных данных с клавиатуры в ответ на запросы с экрана
  AbscissaTxt = InputBox("Введите на русском языке в родительном падеже _
  единственного числа строчными буквами название значения, откладываемого _
  вдоль оси абсцисс графика")
  Abscissa = InputBox("Введите обозначение этой величины")
  AbscissaDim = InputBox("Введите ее размерность латинскими буквами")
  ParametrTxt = InputBox("Введите на русском языке в родительном падеже _
  единственного числа строчными буквами название параметра легенды графика")
  Parametr = InputBox("Введите обозначение этой величины")
  ParametrDim = InputBox("Введите ее размерность латинскими буквами")
  OrdinataTxt = InputBox("Введите на русском языке в именительном падеже _
  единственного числа строчными буквами с заглавной название значения, _
  откладываемого вдоль оси ординат графика")
  Ordinata = InputBox("Введите обозначение этой величины")
  OrdinataDim = InputBox("Введите ее размерность латинскими буквами")
  TextVariable
End Sub

Sub optt_Click () 'процедура переключателя 'abt dat, part dat, ort dat' транспо-
  'нированных исходных данных (с буквой t в конце корня имени каждого файла)
  m = "t". FileDat
End Sub

Sub optUserVID_Click () 'процедура переключателя для ввода вспомогательных
  'исходных данных из файла с именем, указанным пользователем в стандартном
  'окне диалога Открыть (Open), которое появляется на экране после щелчка
  'на кнопке с надписью 'пользователя'
  OpenFileDat frmMAINGG: InputVID
End Sub

Sub optViddat_Click () 'переключатель для ввода вспомогательных
  'исходных данных из файла vid.dat
  FileNameDat = "vid.dat": InputVID
End Sub

Sub OrFl () 'присвоение элементам массива Ordin(r,c) значений из файла данных #1
  ReDim Ordin(r, c) As Single
  If t = 1 Then
    For Nc = 1 To c
      For Nr = 1 To r: Input #1, Ordin(Nr, Nc)  Next
    Next
  Else
    For Nr = 1 To r
      For Nc = 1 To c: Input #1, Ordin(Nr, Nc): Next
    Next

  End If
End Sub

Sub ParFl () 'присвоение элементам массива Param(Nr) значений из файла данных #1
  Nr = 0
  Do While Not EOF(1)
    Nr = Nr + 1: ReDim Preserve Param(Nr) As Single
```

```
    Input #1, Param(Nr)
  Loop
  r = Nr
End Sub
```

GG.BAS

```
Option Base 1
Global Absc() As Single, Param() As Single, Ordin() As Single
Global c As Integer, Nc As Integer, r As Integer, Nr As Integer
Global Ordinata As String, Abscissa As String, Parametr As String
Global OrdinataTxt As String, AbscissaTxt As String
Global ParametrTxt As String, OrdinataDim As String
Global AbscissaDim As String, ParametrDim As String
Global OleClass As String, FileNameDat As String
Global Const OLE_SAVE_TO_FILE = 11, OLE_READ_FROM_FILE = 12
Global Const OFN_FILEMUSTEXIST = &H1000&
Global Const OFN_OVERWRITEPROMPT = &H2&, OFN_PATHMUSTEXIST = &H800&
Global t As Integer, n As Integer, s As Integer
Global dlg As Control

Sub GraphDesign ()  'Процедура изображения данных инструмента
  'Сетка (Grid) с помощью инструмента График (Graph)
  frmBPSGR.Graph1.AutoInc = 1  'установка инструмента Graph на
  'свойство AutoInc (автоматического прироста)
  frmBPSGR.Graph1.Labels = 1 'включение изображения меток
  '(масштабных чисел вдоль осей координат)
  frmBPSGR.Graph1.LegendStyle = 0 'включение монохроматической
  'окраски легенды графика
  frmBPSGR.Graph1.GridStyle = 3 'построение сетки графика
  frmBPSGR.Graph1.GraphType = 6 'установка линейного типа
  'диаграммы в прямоугольной системе координат
  If s = 1 Then
    frmBPSGR.Graph1.GraphStyle = 5 'установка стиля графика, при котором
    'точки изображаются символами и соединяются прямыми линиями
  Else
    frmBPSGR.Graph1.GraphStyle = 4 'установка стиля графика, при котором точки
    'соединяются прямыми линиями, но не изображаются символами
  End If
  frmBPSGR.Graph1.NumPoints = c  'установка числа точек данных в группе
  frmBPSGR.Graph1.NumSets = r  'установка числа групп данных
  frmBPSGR.Graph1.IndexStyle = 1
  frmBPSGR.Graph1.ThickLines = 1 'включено управление толщиной линий графика
  'frmBPSGR.Graph1.PatternedLines = 1 'включено управление типом линий на графике
  'Загрузка массива данных из инструмента Grid в инструмент Graph:
  For Nr = 1 To r
    frmGRD.Grid1.Row = Nr 'для Nr-го ряда сетки Grid1
    For Nc = 1 To c
      frmGRD.Grid1.Col = Nc 'для Nc-й колонки сетки Grid1.      'Преобразование
      'строкового значения свойства Text ячейки сетки Grid1 в числовое
      ' одинарной точности и присвоение его свойству GraphData графика Graph1:
      frmBPSGR.Graph1.GraphData = CSng(frmGRD.Grid1.Text)
    Next
  Next
  For Nr = 1 To r 'число типов линий равно числу рядов сетки


    frmBPSGR.Graph1.PatternData = Nr
  Next                                  'Введение абсцисс точек данных:
  frmGRD Grid1 Row = 0 'для нулевого ряда сетки Grid1
  For Nc = 1 To c
    frmGRD.Grid1 Col = Nc 'для Nc-й колонки сетки Grid1..
    'Преобразование строкового значения свойства Text ячейки сетки Grid1 в
    'числовое одинарной точности и присвоение его свойству XPosData графика
    'Graph1 (откладываются независимые значения вдоль оси абсцисс):
    frmBPSGR Graph1 XPosData = CSng(frmGRD.Grid1.Text)
  Next
  frmBPSGR.Graph1.FontUse = 0 'установка, позволяющая в последующих
  'операторах изменить шрифт текста заголовка (GraphTitle) графика
  frmBPSGR.Graph1.FontSize = 180 'установка размера символов текста заголовка
  'графика в 180 твипов (1 твип = 1/20 пункта)    Вывод надписи над диаграммой:
```

```
  frmBPSGR.Graph1 GraphTitle = Ordinata + "(' + Parametr + "," + Abscissa + ")"
  frmBPSGR.Graph1.FontUse = 1 'установка, позволяющая в последующих
  'операторах изменить шрифт текста под осью абсцисс (BottomTitle)
  'графика и слева от оси ординат (LeftTitle)
  frmBPSGR.Graph1.FontSize = 150 'установка размера символов этого
  'текста в 150 твипов.       Буквенное обозначение абсциссы и ее размерность:
  If t = 1 Then                          'при транспонировании
    frmBPSGR.Graph1.BottomTitle = Parametr + ", " + ParametrDim
  Else                        'при отсутствии транспонирования
    frmBPSGR.Graph1.BottomTitle = Abscissa + ", " + AbscissaDim
  End If                       'слева от оси ординат графика:
  'Буквенное обозначение оси ординат и ее размерность:
  frmBPSGR.Graph1.LeftTitle = Ordinata + ", " + OrdinataDim
  frmBPSGR.Graph1.LabelEvery = 1 'изображение максимально
  'возможного числа меток вдоль оси абсцисс
  frmBPSGR.Graph1.FontUse = 2 'установка, позволяющая в последующих
  'операторах изменить шрифт текста меток графика
  frmBPSGR.Graph1.FontSize = 120 'установка размера символов меток в твипах
  frmBPSGR.Graph1.FontUse = 3 'установка, позволяющая в последующих
  'операторах изменить шрифт текста легенды графика
  frmBPSGR Graph1.FontSize = 120 'установка размера символов текста
  'легенды графика в 120 твипов (1 твип = 1/20 пункта)
  'Буквенное обозначение параметра и его размерность:
  If t = 1 Then               'при транспонировании
    For Nr = 1 To r
      frmBPSGR.Graph1.LegendText = Abscissa + "=" + Format(Param(Nr), "#0.00") _
      + " " + AbscissaDim
    Next
  Else                        'при отсутствии транспонирования
    For Nr = 1 To r
      frmBPSGR.Graph1.LegendText = Parametr + "=" + Format(Param(Nr), "#0.00") _
      + " " + ParametrDim
    Next
  End If
  frmBPSGR.Graph1.DrawMode = 2 'построение графика
End Sub

Sub GridDesign () 'изображение данных в таблице (Grid)
  'Установка числа колонок и рядов:
  frmGRD.Grid1.Cols = c + 1: frmGRD.Grid1.Rows = r + 1
  'Выравнивание по центру для фиксированной колонки:
  frmGRD.Grid1.FixedAlignment(0) = 2
  'Выравнивание по центру для колонок с данными:
  For Nc = 1 To c
    frmGRD.Grid1.FixedAlignment(Nc) = 2 'в фиксированных колонках (с серым фоном)
    frmGRD.Grid1.ColAlignment(Nc) = 2 'в колонках с ординатами (с белым фоном)


  Next
  frmGRD.Grid1.Row = 0 'для нулевого ряда
  For Nc = 1 To c  'ввод меток колонок
    frmGRD.Grid1.Col = Nc: frmGRD.Grid1.Text = Format(Absc(Nc), "#00.00")
  Next
  frmGRD.Grid1.Col = 0 'для нулевой колонки
  For Nr = 1 To r   'ввод меток рядов
    frmGRD.Grid1.Row = Nr: frmGRD.Grid1.Text = Format(Param(Nr), "#00.00")
  Next
  If t = 1 Then  'для транспонированной матрицы ординат
    For Nc = 1 To c 'ввод данных в ячейки
      frmGRD.Grid1.Col = Nc
      For Nr = 1 To r
       frmGRD.Grid1.Row = Nr: frmGRD.Grid1.Text = Format(Ordin(Nr, Nc), "#00.00")
      Next
    Next
  Else           'для нетранспонированной матрицы ординат
    For Nr = 1 To r
      frmGRD.Grid1.Row = Nr
      For Nc = 1 To c
       frmGRD.Grid1.Col = Nc: frmGRD.Grid1.Text = Format(Ordin(Nr, Nc), "#00.00")
      Next
```

```
    Next
  End If              'Выделение колонок не отображается яркостью или миганием:
  frmGRD.Grid1.HighLight = False
End Sub

Sub OpenFileDat (frm As Form) 'вызов стандартного окна диалога
  'Открыть (Open), с помощью которого переменной FileNameDat
  'присваивается имя файла, выделенного пользователем в этом окне
  frm.dlg.Filename = ""
  'Указываются типы файлов, которые можно вызвать через окно диалога:
  frm.dlg.Filter = "Файлы данных (*.DAT)|*.DAT|Все файлы (*.*)|*.*"
  frm.dlg.FilterIndex = 1 'в окне диалога появляются файлы данных типа *.DAT
  frm.dlg.Flags = OFN_FILEMUSTEXIST Or OFN_PATHMUSTEXIST 'присвоение значений
  'этих констант свойству Flag позволяет пользователю ввести только существующий
  'файл. При вводе неверного имени или пути выводится сообщение об ошибке.
  frm.dlg.Action = 1
  If frm.dlg.Filename = "" Then MsgBox "Файл не выбран. Вам следует нажимать на _
кнопку Enter (или щелкать по кнопке OK) в ответ на сообщения с экрана, потом на _
End на панели инструментов VB, а затем заново запустить программу на Run Start":
Exit Sub
  FileNameDat = frm.dlg.Filename
End Sub

Sub SaveFileDat (frm As Form) 'вызов стандартного окна диалога
  'Сохранить как (Save As), с помощью которого переменной
  'FileNameDat присваивается имя файла, назначенного пользователем в этом окне
  frm.dlg.DefaultExt = "DAT": frm.dlg.Filename = ""
  frm.dlg.Filter = "Файлы данных (*.DAT)|*.DAT|Все файлы (*.*)|*.*"
  frm.dlg.FilterIndex = 1
  frm.dlg.Flags = OFN_OVERWRITEPROMPT Or OFN_PATHMUSTEXIST 'присвоение значений
  'этих констант свойству Flag выводит на экран сообщение, если пользователь ввел
  'имя существующего файла. Пользователь должен подтвердить свое намерение
  'записать новый файл поверх старого или отказаться от этого.
  frm.dlg.Action = 2 'вызов диалога Сохранить как
  MsgBox "Идет запись в файл " + frm.dlg.Filename: FileNameDat = frm.dlg.Filename
End Sub

Sub TextVariable ()  'присвоение значений вспомогательных исходных данных,

  'введенных в процедуре InputVID формы 'Главная' или процедуре OptKeyVID там же,
  'свойствам Text девяти текстовых полей, изображенных полужирным
  'шрифтом в трех верхних строках формы 'Таблица данных'
  frmGRD.txtOrdinataTxt.Text = OrdinataTxt: frmGRD.txtOrdinata.Text = Ordinata
  frmGRD.txtOrdinataDim.Text = OrdinataDim
  frmGRD.txtParametrTxt.Text = ParametrTxt: frmGRD.txtParametr.Text = Parametr
  frmGRD.txtParametrDim.Text = ParametrDim
  frmGRD.txtAbscissaTxt.Text = AbscissaTxt: frmGRD.txtAbscissa.Text = Abscissa
  frmGRD.txtAbscissaDim.Text = AbscissaDim
End Sub

Sub VariableText ()  'присвоение значениям вспомогательных исходных данных
  'значений свойства Text девяти текстовых полей, изображенных полужирным
  'шрифтом в трех верхних строках формы 'Таблица данных'
  OrdinataTxt = frmGRD.txtOrdinataTxt.Text
  ParametrTxt = frmGRD.txtParametrTxt.Text
  AbscissaTxt = frmGRD.txtAbscissaTxt.Text: Ordinata = frmGRD.txtOrdinata.Text
  Parametr = frmGRD.txtParametr.Text: Abscissa = frmGRD.txtAbscissa.Text
  OrdinataDim = frmGRD.txtOrdinataDim.Text
  ParametrDim = frmGRD.txtParametrDim.Text
  AbscissaDim = frmGRD.txtAbscissaDim.Text
End Sub

Sub VID ()
  'Присвоение значений эталонных вспомогательных исходных данных свойствам Text
  'девяти текстовых полей, изображенных полужирным шрифтом в трех верхних строках
  'формы 'Таблица данных'. Они появляются над таблицей при запуске программы
  'без ввода вспомогательных исходных данных:
  frmGRD.txtOrdinataTxt.Text = "Потокосцепление"
  frmGRD.txtParametrTxt.Text = "перемещения"
```

```
  frmGRD.txtAbscissaTxt.Text = "тока обмотки": frmGRD.txtOrdinata.Text = "Psi"
  frmGRD.txtParametr.Text = "x": frmGRD.txtAbscissa.Text = "i"
  frmGRD.txtOrdinataDim.Text = "Wb": frmGRD.txtParametrDim.Text = "mm"
  frmGRD.txtAbscissaDim.Text = "mA"
  VariableText 'присвоение значений эталонных вспомогательных исходных данных
  'переменным, которые выводят обозначения осей координат, параметра, их
  'размерность и название графика BPSGraph при загрузке, минуя ввод
  'вспомогательных исходных данных.
  'Присвоение свойствам Caption шести меток, показанных в трех верхних строках
  'формы 'Таблица данных' обычным шрифтом, строковых значений:
  Dim k As Integer
  For k = 0 To 2: frmGRD.Label4(k).Caption = " в ": Next
  frmGRD.Label1.AutoSize = True
  frmGRD.Label1.Caption = " (цифры на белом фоне) в зависимости от"
  frmGRD.Label2.AutoSize = True: frmGRD.Label3.AutoSize = True
  If t = 1 Then
    frmGRD.Label3.Caption = " (цифры левого столбца на сером фоне)"
    frmGRD.Label2.Caption = " (цифры верхнего ряда на сером фоне) и"
  Else
    frmGRD.Label2.Caption = " (цифры левого столбца на сером фоне) и"
    frmGRD.Label3.Caption = " (цифры верхнего ряда на сером фоне)"
  End If
End Sub
```

BPSGR.FRM

```
Sub cmdBack_Click () 'возврат к форме 'Таблица данных'
  frmBPSGR.Hide
End Sub

Sub cmdEnd_Click () 'конец работы программы (переход к режиму
  'проектирования - design)
  End
End Sub

Sub cmdPrint_Click () 'вывод графика на принтер в векторном
  'формате без рамки формы и без изображения кнопок
  frmBPSGR.Graph1.DrawMode = 5
End Sub
```

HLP1.FRM

```
Sub cmdBack_Click () 'возврат к форме, в которой пользователь
  'щелкнул на кнопке 'Помощь'
  frmHLP1.Hide
End Sub

Sub cmdNext_Click () 'переход к следующей странице пояснений
  frmHLP1.Hide : Load frmHLP2: frmHLP2.Show 1
End Sub

Sub cmdPrint_Click ()
  PrintForm
End Sub

Sub Form_Load () 'вывод текста на форму 'Помощь1'
  autoredraw = True
  Print "     Вы работаете с программой G&G построения таблицы и графиков по _
  данным, кото-"
  Print " рые можно ввести из файлов или с клавиатуры. Создана на VB3 в февр. _
  1999г."
  Print "     Автор - Буль О.Б., МГОУ."
  Print "    Для ввода из файлов необходимо на текущем диске иметь хотя бы один _
  их комплект,"
  Print " состоящий из трех файлов данных. Если это файлы с именами,"
  Print " назначенными программой и приведенными на форме 'Главная' справа от _
  круглых"
```

```
  Print " кнопок внутри рамки с именем 'программой:' (например, 'ab1.dat , _
  par1.dat , or1.dat'), "
  Print " то для ввода достаточно нажать ту из этих круглых кнопок , файлы для _
  которой "
  Print " имеются на текущем диске. В именах этих кнопок 'ab' с любой из цифр _
  1, 2, 3 озна-"
  Print " чает файл данных , предназначенный для величин, откладываемых вдоль _
  оси абсцисс "
  Print " графика и в верхнем (сером) ряду таблицы; 'par' с любой из цифр _
  1, 2, 3 - для величин,"
  Print " откладываемых в качестве параметра в легенде графика и в левом сером _
  столбце таб-"
  Print " лицы; 'or' с цифрами 1, 2, 3 - для величин, откладываемых вдоль оси _
  ординат. Число цифр"
  Print " файла ab1.dat должно быть равно числу столбцов структурированной _
  матрицы данных "
  Print " файла or1.dat , а число цифр файла par1.dat - числу строк этой _
  матрицы. Аналогичными"
  Print " свойствами должны обладать и другие комплекты файлов данных."
  Print "   Комплект abt.dat , part.dat , ort.dat предназначен для построения _
  кривых , в которых в"
  Print " качестве абсциссы откладывается величина , использованная в основном _
  варианте как"

  Print " параметр, а в качестве параметра - величина , которая использовалась _
  как"
  Print " абсцисса. Таким образом, если за исходный вариант взять комплект 1, _
  то файл abt.dat"
  Print " повторяет par1.dat , файл part.dat - ab1.dat , файл ort.dat - _
  or1.dat. Перед щелчком  на круг-"
  Print " лой кнопке abt ,...ort.dat необходимо активизировать переключатель, _
  расположенный в"
  Print " верхней части формы 'Главная' (рядом с ним должна появиться надпись _
  'матрица "
  Print " транспонирована'). После щелчка на кнопке abt ,...ort.dat программа _
  далее"
  Print " сама транспонирует файл ort.dat , превращая столбцы его матрицы в _
  строки и наоборот."
  Print "    Для возврата к первой форме щелкните на кнопке 'Возврат'; для _
  продолжения по-"
  Print " яснений - на кнопке 'Следующая'."
End Sub
```

OLEGR.FRM

```
Sub cmdEnd_Click () 'конец работы программы
  End
End Sub

Sub cmdHome_Click () 'возврат к форме 'Таблица данных'
  frmOLEGR.Hide
End Sub

Sub cmdPrint_Click () 'вывод графика на принтер
  PrintForm
End Sub

Sub Form_Load ()
  OLE1.Format = "CF_TEXT" 'установка текстового формата
  OLE1.SizeMode = 2   'автоматическое изменение размеров OLE-
  'инструмента при изменении размеров объекта
  OLE1.Class = "MSGRAPH"  'внедрение объекта "MSGRAPH" OLE-класса
  OLE1.Action = 0
  If n = 0 Then                'Объявление переменных:
    Dim Msg As String, NL As String, TB As String
    TB = Chr(9)      'символ табуляции
    NL = Chr(10)     'переход на новую строку.
    'Создание данных для замены данных "MSGRAPH", принятых по умолчанию:
```

```
Msg = TB + Format(absc(1), "#00.00")
For Nc = 2 To c
  Msg = Msg & TB & Format(absc(Nc), "#00.00")
Next
For Nr = 1 To r
  Msg = Msg + NL & Format(param(Nr), "#00.00")
  For Nc = 1 To c
    Msg = Msg & TB & Format(ordin(Nr, Nc), "#00.00")
  Next
Next
OLE1.Verb = -3
OLE1.Action = 7  'активизация объекта OLE-класса
If OLE1.AppIsRunning Then
  OLE1.DataText = Msg 'присвоение данных свойству DataText
  OLE1.Action = 6  'обновление данных приложения "MSGRAPH"
  'и показ их, как рисунок OLE-инструмента

    Else
      MsgBox "График не изменялся."
    End If
  End If
End Sub
```

GRD.FRM

```
Sub chkPoints_Click () 'включает при s=1 и отключает при s=0
  'изображение символов точек кривых
  If chkPoints.Value = 1 Then s = 1 Else s = 0
End Sub
Sub cmdBack_Click () 'возврат к форме 'Главная'
  frmGRD.Hide
End Sub
Sub cmdBPS_Click () 'построение графика с помощью инструмента GRAPH1 фирмы
  'Bit Per Second, встроенного в VB 3 профессиональной редакции
  VariableText: Load frmBPSGR: GraphDesign: frmBPSGR.Show 1
End Sub
Sub cmdEnd_Click () 'конец работы программы
  End
End Sub
Sub cmdHelp_Click () 'справка о работе с программой
  Load frmHLP1: frmHLP1.Show 1
End Sub
Sub cmdPrint_Click () 'печать принтером формы во время исполнения программы
  PrintForm
End Sub

Sub Form_Load ()
  s = 1 'режим изображения кривых на графике BPS с символами точек
End Sub

Sub optDefault_Click () 'построение графика MSGRAPH по умолчанию
  n = 1: Load frmOLEGR: frmOLEGR.Show 1
End Sub
Sub optNew_Click () 'построение нового графика
  n = 0: Load frmOLEGR: frmOLEGR.Show 1
End Sub

Sub txtAbscissa_KeyPress (KeyAscii As Integer) 'присвоение переменной Abscissa
  'значений символов текста, введенных в текстовое поле txtAbscissa
  Abscissa = txtAbscissa.Text
End Sub

Sub txtAbscissaDim_KeyPress (KeyAscii As Integer) 'присвоение переменной
 'AbscissaDim значений символов текста, введенных в текстовое поле txtAbscissaDim
  AbscissaDim = txtAbscissaDim.Text
End Sub
```

```
Sub txtAbscissaTxt_KeyPress (KeyAscii As Integer) 'присвоение переменной
 'AbscissaTxt значений символов текста, введенных в текстовое поле txtAbscissaTxt
  AbscissaTxt = txtAbscissaTxt.Text
End Sub
```

Далее следуют реагирующие на событие KeyPress процедуры txtOrdinata, txtOrdinataDim, txtOrdinataTxt, txtParametr, txtParametrDim, txtParametrTxt, которые опущены, так как их код аналогичен коду трех последних процедур модуля GRD.FRM

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

ОБЪЕКТЫ ПРОГРАММЫ G&G

Таблица 1. **Формы программы G&G по порядку их следования в файле G&G.MAK**

Название объекта	Имя объекта	Имя файла	Надпись	№ таблицы
Форма	frmMAINGG	MAINGG.FRM	Главная	6.2
Форма	frmBPSGR	BPSGR.FRM	График BPSGraph	6.3
Форма	frmHLP1	HLP1.FRM	Помощь1	6.4
Форма	frmOLEGR	OLEGR.FRM	График MSGraph	6.5
Форма	frmHLP2	HLP2.FRM	Помощь2	—
Форма	frmGRD	GRD.FRM	Таблица данных	6.6
Форма	frmHLP3	HLP3.FRM	Помощь3	—
Форма	frmHLP4	HLP4.FRM	Помощь4	—
Форма	frmHLP5	HLP5.FRM	Помощь5	—

Таблица 2. **Объекты формы frmMAINGG «Главная» по порядку их следования в листинге программы G&G (Приложение 16)**

Название объекта	Имя	Надпись
Форма	frmMAINGG	Главная
Флажок	chkTranspose	Матрица не транспонирована (изменяется на «Матрица транспонирована» программным путем)

Название объекта	Имя	Надпись
Командная кнопка	cmdEND	Конец
Командная кнопка	cmdHelp	Помощь
Командная кнопка	cmdOpen3Dialog	пользователем
Командная кнопка	cmdPrint	Печать
Командная кнопка	cmdSaveVid	Запись
Командная кнопка	cmdTabl	Таблица
Переключатель	opt1	ab1.dat, par1.dat, or1.dat
Переключатель	opt2	ab2.dat, par2.dat, or2.dat
Переключатель	opt3	ab3.dat, par3.dat, or3.dat
Переключатель	optKeyVID	с клавиатуры
Переключатель	optt	abt.dat, part.dat, ort.dat
Переключатель	optUserVID	пользователя
Переключатель	optViddat	vid.dat
Стандартное диалоговое окно	dlg	—
Рамка	Frame1	программой:
Рамка	Frame2	Вспомогательные исходные данные
Рамка	Frame5	Файлы данных с именами, назначенными
Рамка	Frame7	из файла:

Таблица 3. **Объекты формы frmBPSGR «График BPSGraph»**

Название объекта	Имя	Надпись
Форма	frmBPSGR	График BPSGraph
Командная кнопка	cmdBack	Возврат
Командная кнопка	cmdEnd	Конец
Командная кнопка	cmdPrint	Печать
График	Graph1	—

Таблица 4. **Объекты формы frmHLP1 «Помощь1»**

Название объекта	Имя	Надпись
Форма	frmHLP1	Помощь1
Командная кнопка	cmdBack	Возврат
Командная кнопка	cmdNext	Следующая
Командная кнопка	cmdPrint	Печать

Таблица 5. **Объекты формы frmOLEGR «График MSGraph»**

Название объекта	Имя	Надпись
Форма	frmOLEGR	График MSGraph
Командная кнопка	cmdEnd	Конец
Командная кнопка	cmdHome	Возврат
Командная кнопка	cmdPrint	Печать

Таблица 6. **Объекты формы frmGRD «Таблица данных»**

Название объекта	Имя	Надпись
Командная кнопка	cmdBack	Возврат
Командная кнопка	cmdBPS	BPSGraph
Командная кнопка	cmdEnd	Конец
Командная кнопка	cmdHelp	Следующая
Командная кнопка	cmdPrint	Печать
Переключатель	optNew	новый
Переключатель	optDefanlt	по умолчанию
Флажок	chkPoints	символы точек кривых
Текстовое поле	txtAbscissa	—
Текстовое поле	txtAbscissaDim	—
Текстовое поле	txtAbscissaTxt	—
Текстовое поле	txtOrdinata	—
Текстовое поле	txtOrdinataDim	—
Текстовое поле	txtOrdinataTxt	—
Текстовое поле	txtParametr	—
Текстовое поле	txtParametrDim	—
Текстовое поле	txtParametrTxt	—
Сетка	Grid1	—
Рамка	Frame3	Графики:
Рамка	Frame4	MSGraph
Метка	Lable1	—
Метка	Lable2	—
Метка	Lable3	—
Метка	Lable4(0)	—
Метка	Lable4(1)	—
Метка	Lable4(2)	—
Метка	Lable5	символы точек кривых

Таблица 7. **Названия инструментов (объектов), использованных в программе G&G, и префиксы их имен**

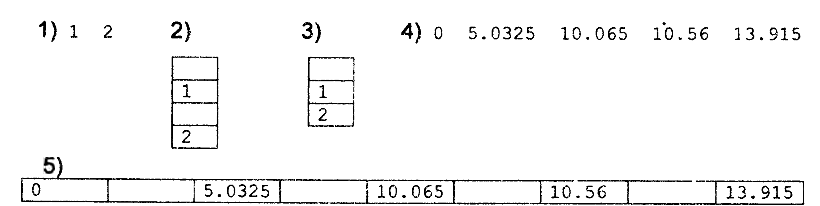
Русское	Английское	Префикс
График	Graph	—
Командная кнопка	Command Button	cmd
Метка	Lable	lbl
Переключатель	Option Button	opt
Рамка	Frame	—
Связь и внедрение объектов (инструмент OLE)	OLE (Object Linking and Embedding)	—
Сетка	Grid	—
Стандартное диалоговое окно	Common Dialog	—
Текстовое окно	Text Box	txt
Флажок	Check Box	chk

Таблица 8. **Соответствие некоторых важных английских и русских терминов VB**

Английский	Русский	Пояснение
Name	Имя	По этому имени к объекту обращаются в коде программ, может быть только на английском языке
Caption	Надпись (название)	Обозначает объект. Например, заголовок формы; надпись на командной кнопке; надпись рядом с переключателем. Может быть и на русском языке
File name	Имя файла	Под этим именем файл записывается на диск. В программе любое имя форм без префиксов frm совпадает с корнем имени файла, но это не обязательно. В VB 3 имена файлов могут быть только на английском языке
Object name	Название объекта	Например, Форма, Текстовое поле, Переключатель и т. п. В гл. 6 используются русские названия

ПРИЛОЖЕНИЕ 18

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ В WORD 97 ТАБЛИЦЫ ДАННЫХ ИЗ ФАЙЛОВ par2.dat, ab2.dat, or2.dat ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧЕЧНОЙ ДИАГРАММЫ



6)

0	5.0325	10.065	10.56	13.915

7)

	0	5.0325	10.065	10.56	13.915
1					
2					

8) 29.86848 62.38066 172.6565 194.8117 506.2209
8 29 50 120 200

9)

	29.8 6848		62.3 8066		172. 6565		194. 8117		506. 2209	
	8		29		50		120		200	

10)

29.86848	62.38066	172.6565	194.8117	506.2209
8	29	50	120	200

11)

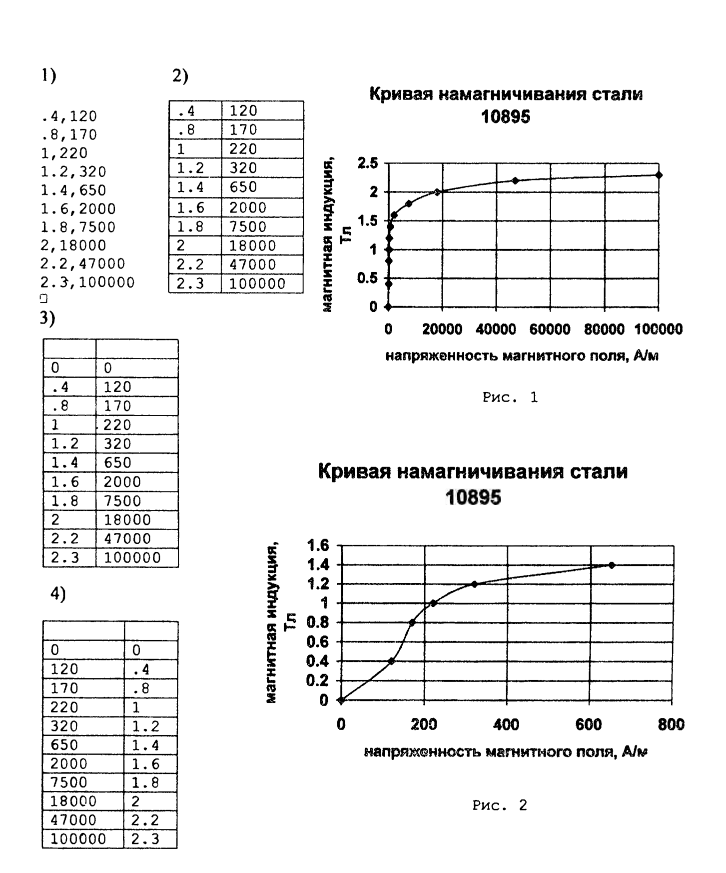
	0	5.0325	10.065	10.56	13.915
1	29.86848	62.38066	172.6565	194.8117	506.2209
2	8	29	50	120	200

12)

	0	5.0325	10.065	10.56	13.915
1	29.86848	62.38066	172.6565	194.8117	506.2209
2	8	29	50	120	200

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТАБЛИЦЫ И [illegible]МЫ, ПОСТРОЕННЫЕ MSGRAPH 97 ПО ДАННЫМ [illegible] bh10895.dat



1)

```
.4,120
.8,170
1,220
1.2,320
1.4,650
1.6,2000
1.8,7500
2,18000
2.2,47000
2.3,100000
```

2)

.4	120
.8	170
1	220
1.2	320
1.4	650
1.6	2000
1.8	7500
2	18000
2.2	47000
2.3	100000

3)

0	0
.4	120
.8	170
1	220
1.2	320
1.4	650
1.6	2000
1.8	7500
2	18000
2.2	47000
2.3	100000

4)

0	0
120	.4
170	.8
220	1
320	1.2
650	1.4
2000	1.6
7500	1.8
18000	2
47000	2.2
100000	2.3

Рис. 1

Рис. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 20

СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ ФАЙЛОВ ДАННЫХ С КЛАВИАТУРЫ

В редакторе Norton Commander (NC) на базе любого существующего файла данных

1. Выделить в панели NC имя этого файла данных и нажать и отпустить клавишу [F4] (загрузка файла в режиме редактирования). На экране возникает его содержание.

2. Удалить содержание выбранного файла и ввести с клавиатуры нужные данные (или заменить старые элементы файла новыми). При этом нельзя нарушать структуру файла. Так, в Приложении 15 каждое число имеет слева и справа по пробелу, два соседних числа разделены двумя пробелами. В новом файле данных должно быть так же. Чтобы ввести новую строку данных, необходимо установить курсор в конце предыдущей строки, а затем нажать и отпустить клавишу [Enter]. Число элементов в каждой строке структурированного файла данных должно быть одинаковым.

3. После редактирования файла нажать клавишу [Shift] и, удерживая ее, нажать и отпустить клавишу [F2], затем отпустить клавишу [Shift]. В появившемся на экране окне **Save File** набрать новое имя файла и нажать и отпустить клавишу [Enter].

В системном редакторе Блокнот (NotePad),

являющемся стандартной программой графических операционных систем Windows 95, 98 и графических оболочек Windows 3.1 и 3.11.

1. Щелкнуть на кнопке **Пуск — Программы — Стандартные — Блокнот**. В появившемся окне редактора **Блокнот** ввести с клавиатуры элементы файла данных с соблюдением принятой структуры, например, такой, как в Приложениях 13 и 15.

2. Записать на диск. По умолчанию Блокнот дает файлам расширение txt. Поэтому если необходимо расширение dat, то его и точку перед ним надо ввести в явном виде.

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ ДЛЯ РАБОТЫ С MCAD

В системе MCAD, как и практически в любой Windows-программе, в графической оболочке Windows 3.1 (или 3.11) и графических операционных системах Windows 95 и 98, один и тот же результат можно получить несколькими способами. Ниже описаны только те, с помощью которых, по нашему мнению, результат можно получить быстрее и проще.

В п. 2 — п. 4 этого приложения приведены приемы работы пользователя в системе MCAD 6.0. В MCAD 8 они могут несколько отличаться от описанных. Работа с рисунками MCAD 8 затронута в конце п. 3.2 основной части книги.

1. Запуск системы MCAD, загрузка и сохранение рабочих документов, их вывод на принтер и выход из MCAD

Пользователи, знакомые с любой программой, предназначенной для работы с графической оболочкой Windows 3.1 (3.11) или для работы в графической операционной системе Windows 95 или 98, например, с Word для Windows, могут не читать

Рис. 1. Окно Диспетчера программ в Windows 3.1

п. 1, так как обозначенные в его названии файловые операции стандартны практически для всех программ Windows. Небольшое отличие имеется только в характере диалоговых окон графической оболочки и графической операционной системы. Учитывая важное значение названных файловых операций, а также то обстоятельство, что слабо подготовленные или вообще неподготовленные пользователи MCAD не смогут без них обойтись, мы решили кратко эти операции здесь описать.

1.1. Запуск системы

1.1.1. В Windows 3.1 (или 3.11)

В окне **Диспетчер Программ** найти значок с подписью **MathSoft Apps** (рис. 1) и дважды щелкнуть на нем. В раскрывшемся окне с заголовком **MathSoft Apps** (рис. 2) дважды щелкнуть на пиктограмме с подписью **Mathcad PLUS 6.0** с изображением ручных счетов и знака плюс (+), закрывающего правый нижний угол счетов. Если вместо окна **Диспетчер Программ** на рабочем столе Windows имеется пиктограмма с подписью **Диспетчер Программ**, то для раскрытия окна Диспетчера Программ надо дважды щелкнуть на этой пиктограмме.

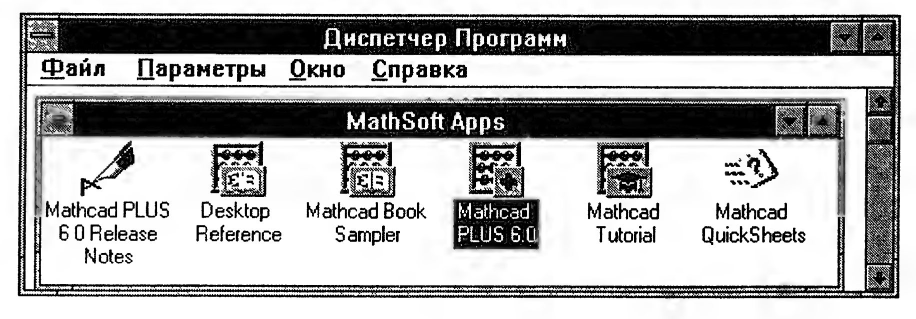


Рис. 2. Окно программной группы MCAD PLUS 6.0 в окне Диспетчера программ Windows 3.1

Щелкнуть на кнопке **Пуск**, расположенной в левом нижнем углу экрана. В раскрывшемся при этом главном меню выделить **Программы**, в раскрывшемся подменю — **MathSoft Apps** и, наконец, в раскрывшемся меню следующего уровня вложенности щелкнуть на строке **Mathcad PLUS 6.0** (или на строке **Mathcad 8**). Примерный вид экрана перед последнием щелчком показан на рис. 3, окно системы MCAD PLUS 6.0 сразу после загрузки — на рис. 4, окно MCAD 8 — на рис. 5. Окна на рис. 4 и 5 по высоте уменьшены (для экономии места) путем перетаскивания мышью их нижних границ. Для разворачивания этих окон во весь экран достаточно щелкнуть на второй справа кнопке их верхней строки.

Обратим внимание на то, что среди пиктограмм вывода наборных панелей, расположенных на рис. 4 в третьем сверху ряду окна (под строкой меню), имеется пиктограмма вывода операторов внутренних программ MCAD (вторая справа — в виде прямоугольника и ромба, соединенных двумя стрелками, образующими замкнутый контур), а среди пиктограмм наборных панелей на рис. 5 в пятом ряду сверху (сразу над серым окном редактирования) такой кнопки нет. Это говорит о том, что на рис. 4 — окно профессиональной редакции MCAD, а на рис. 5 — стандартной. Для нас это существенно потому, что рабочие документы DRDCON, DROFF, DRLOOP (Приложения 7 — 9) и DUON (Приложение 14) могут исполняться только при наличии профессиональной редакции MCAD.

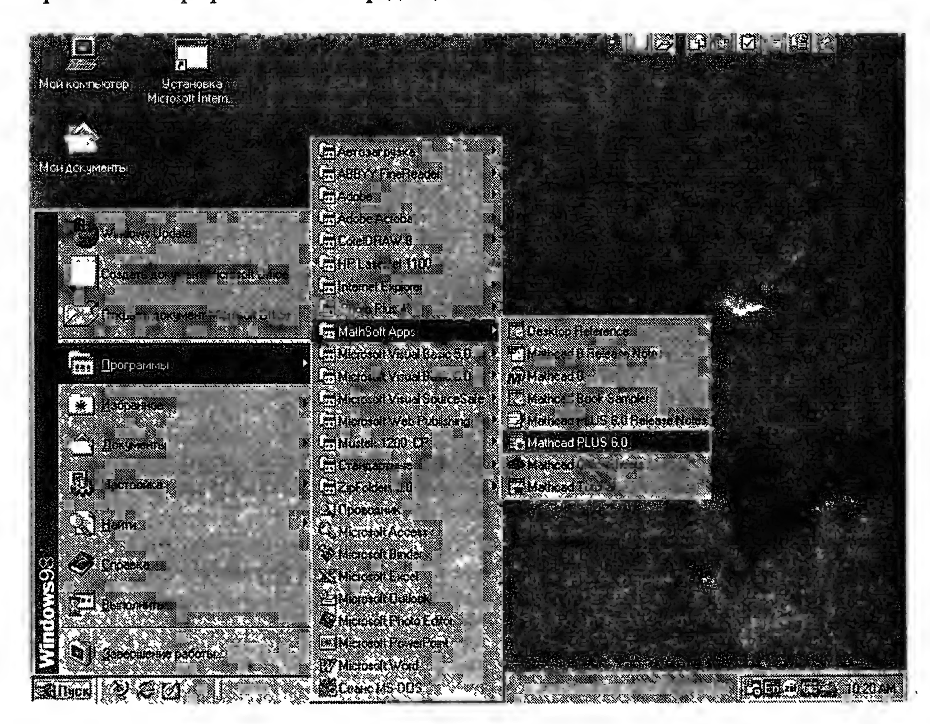


Рис. 3. Последовательность операций при загрузке системы MathCAD в Windows 98

Для открытия рабочего документа MCAD надо щелкнуть на кнопке **Открыть** (вторая слева в четвертом ряду на рис. 4 или в третьем на рис. 5). **Возникает** стандартное окно диалога **Open** (Открыть) (рис. 6), в котором необходимо указать название папки (каталога) в поле **Папка:** и название файла (рабочего документа) в поле со списком файлов, занимающем на рис. 6, *а* большую часть окна диалога. Имя, выделенное в списке, появляется в поле **Имя файла:**. Теперь достаточно щелкнуть на кнопке **Открыть** рис. 6, *а* или **ОК** рис. 6, *б*, чтобы окно диалога **Open** пропало с экрана, а в окне редактирования MCAD появился бы текст загружаемого рабочего документа. По умолчанию он сразу начинает исполняться.

То же самое мы получим, если дважды щелкнем на строке с нужным именем в списке файлов окна **Open**. Можно также в поле **Имя файла:** набрать имя рабочего документа с клавиатуры и щелкнуть на кнопке **Открыть**.

Для сохранения рабочего документа необходимо щелкнуть на строке **Save As...** (Сохранить как...) меню **File**. После этого на экране возникает стандартное окно диалога **Save As** (рис. 7), в котором в поле **Папка:** указывается путь доступа к сохраняемому файлу, а в поле **Имя файла:** редактируется старое или вводится новое имя. Расширение MCD с точкой перед ним можно не вводить — система MCAD добавит их к корню имени автоматически. Файл записывается на твердый носитель информации после щелчка на кнопке **Сохранить**.

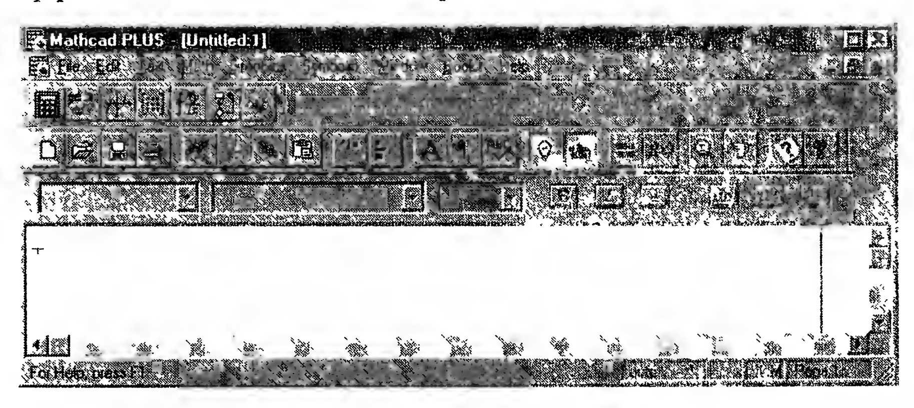


Рис. 4. Вид окна системы MCAD PLUS 6.0 PRO сразу после ее загрузки

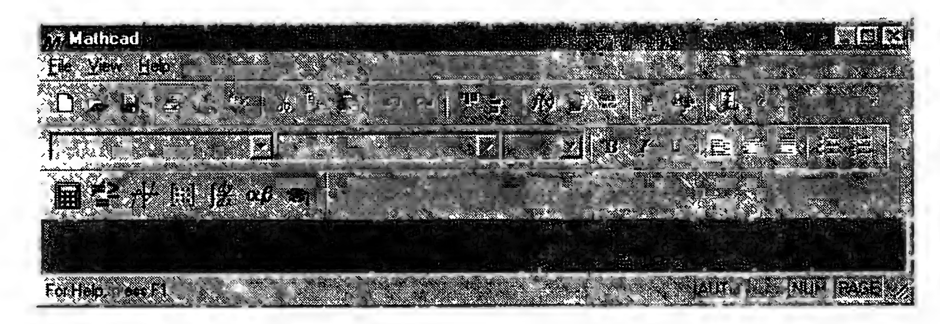
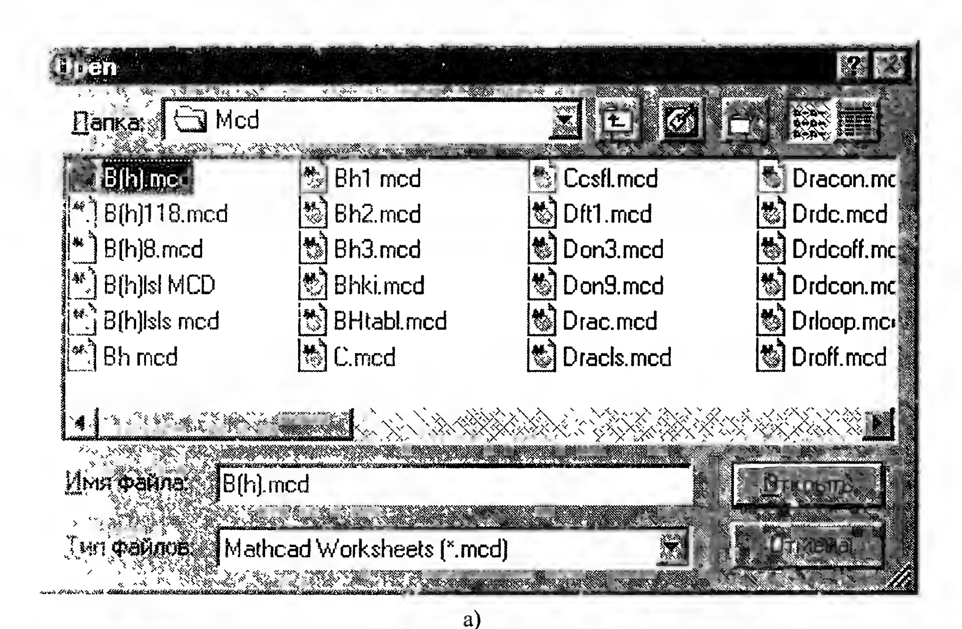


Рис. 5. Вид окна системы MCAD 8 Standard сразу после загрузки



а)

б)

Рис. 6. Стандартное окно **Open** (Открыть) MCAD 8.0 (*а*) и MCAD 6.0 (*б*) в Windows 98

Для записи файла под старым именем в старую папку достаточно щелкнуть на кнопке **Сохранить** строки инструментов. На этой кнопке изображена дискета. На рис. 4 она — третья слева в 4-м ряду сверху, на рис. 5 — третья слева в 3-м ряду сверху.

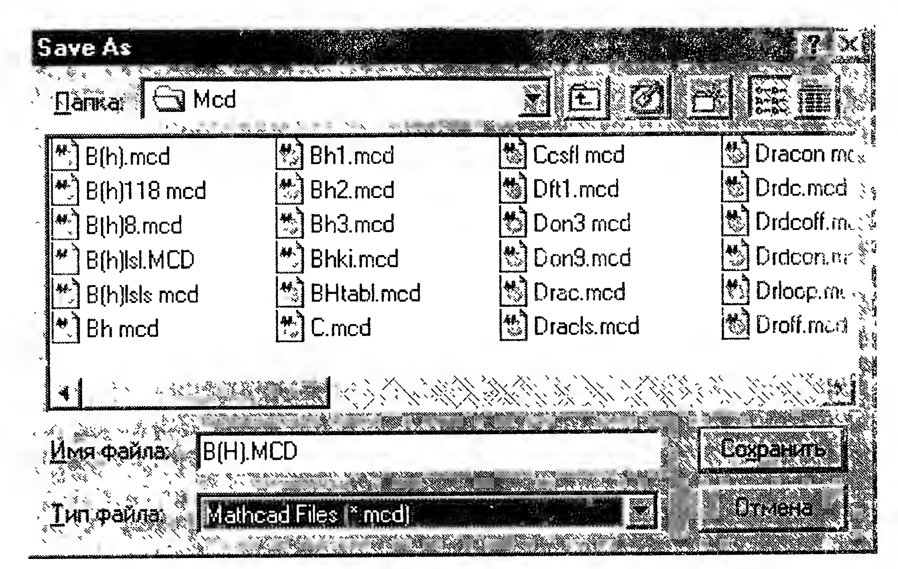


Рис. 7. Стандартное окно **Save as** (Сохранить как) MCAD 8 в Windows 98

1.3. Печать и выход из системы MCAD

Для вывода текста рабочего документа на принтер с установками по умолчанию достаточно щелкнуть на кнопке **Печать** строки инструмента. На этой стандартной для Windows кнопке изображен принтер, на рис. 4 она — четвертая в четвертом ряду сверху, на рис. 5 — четвертая в третьем ряду сверху.

Если щелкнуть на строке **Print...** (Печать...) меню **File**, то на экране возникнет окно диалога **Print**, вид которого зависит от принтера, принятого в системе по умолчанию. Для принтера HP LaserJet 1100 оно показано на рис. 8. С помощью этого окна можно изменить установки принтера, например, напечатать не все, а только указанные пользователем страницы рабочего документа и т. п. Для начала печати необходимо щелкнуть на кнопке **OK** этого окна.

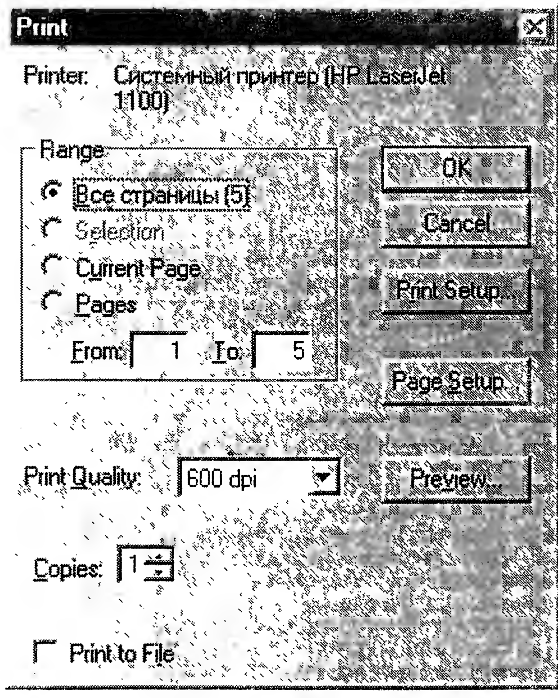


Рис 8. Окно **Print** (Печать)

Для выхода из системы MCAD достаточно дважды щелкнуть на пиктограмме MCAD, расположенной в левом углу верхней строки окна MCAD, или однократно — на кнопке со знаком умножения в правом углу этой строки.

2. Ввод данных

Прежде чем вводить данные и тем более редактировать исходный рабочий документ, запишите его на диск под новым именем, чтобы при очередной записи случайно не повредить файл-первоисточник.

2.1. Редактирование числовых значений величин

Для изменения числового значения, присвоенного какой-либо переменной (оно должно стоять справа от двоеточия и знака равенства), надо щелкнуть на этом значении. В месте щелчка возникнет вертикальная синяя черта (курсор). С помощью клавиши [Delete] можно удалять цифры, стоящие справа от нее, а с помощью клавиши [BackSpace] — цифры слева от нее. С клавиатуры вводятся цифры справа от курсора. Для завершения ввода достаточно нажать и отпустить клавишу [Enter] или щелкнуть мышью на свободном поле документа.

Для изменения числового значения какого-либо элемента матрицы, стоящей справа от знака присвоения, щелкните на этом элементе. Возникает синяя вертикальная черта (курсор), которая позволяет изменять этот элемент так же, как это было описано только что для числового значения переменной. Для перехода к редактированию другого элемента щелкните на нем. Для ввода новых значений щелкните где-либо вне матрицы.

Можно также присвоить новое значение любому элементу матрицы с помощью выражения $M_{r,c}$:=, в котором справа от знака присвоения должно стоять новое числовое значение этого элемента. Здесь M — имя матрицы, r — номер ряда, s — номер столбца элемента. По умолчанию ряды и столбцы матрицы нумеруются, начиная от 0. Поэтому у 2-го столбца c=1, у 3-го ряда r=2.

2.2. Ввод массивов данных

Одиночное число в MCAD называется *скаляром*, столбец или строка чисел — *вектором*, прямоугольная таблица чисел — *матрицей*. Термином *массив* можно назвать как вектор, так и матрицу. Операторы и функции, принимающие векторный аргумент, ожидают *вектор-столбец*, они не применимы к вектору-строке. Вектор-строку можно преобразовать в вектор-столбец с помощью операции транспонирования (обозначается прописной латинской буквой T на месте верхнего индекса).

В документах MCAD массивы отображаются в виде строк и столбцов чисел, заключенных между скобками, как, например, в Приложении 22, или в виде таблиц, как матрица BH и векторы vB, vH Приложения 1. К большим таблицам автоматически добавляются полосы прокрутки.

В рабочих документах, приведенных в приложениях книги, *ввод массивов* осуществляется *из текстовых файлов* формата ASCII, созданных другими программами, например, QB, или другими документами MCAD, или с клавиатуры. Два способа создания таких файлов данных с клавиатуры приведены в Приложении 20. Ниже на примере ввода координат 8 точек кривой намагничивания сплава 79НМ (по данным рис. 1.5 из [6]) описан порядок действий пользователя для *ввода массива данных с клавиатуры с помощью инструмента Матрица*. Этот ввод осуществляется путем присвоения числовых значений отдельным элементам матрицы BH с помощью команды **Matrices** пункта **Math** главного меню системы MCAD.

После щелчка на том месте, на котором вы хотите получить шаблон для ввода числовых значений матрицы, наберите BH и нажмите и отпустите клавишу двоеточия — появится знак присвоения := (двоеточие, за которым следует равенство). Выберите команду **Matrices** пункта **Math** главного меню или щелкните на пиктограмме наборной панели матричных операторов (четвертая слева в 3-м ряду на рис. 4 или

в 5-м на рис. 5), а затем на такой же пиктограмме в раскрывшейся наборной панели. Появится диалоговое окно **Matrices** (рис. 9), в котором необходимо с клавиатуры ввести цифру 8 в поле **Rows:** (Число рядов:) и 2 в поле **Columns:** (Число столбцов:). После щелчка на кнопке **Create** (Создать) этого окна за знаком присвоения появится шаблон матрицы в виде шестнадцати маленьких черных прямоугольников, расположенных в 2 столбца и 8 рядов внутри прямоугольных скобок. Верхний левый прямоугольник окружен рамкой выделения, у которой верхняя сторона наклонена к горизонтальной нижней, остальные две — вертикальны. Наберите нужное число (в нашем случае 0), нажмите и отпустите клавишу [Tab]. Рамка выделения перейдет на левый черный прямоугольник второго ряда. Снова наберите число, нажмите и отпустите [Tab]. В левом столбце введите, как и в документе B(H) (Приложение 1), значения индукций в Тл. Если после набора последнего (8-го) значения индукции нажать и отпустить клавишу [Tab], то выделение переходит на верхний черный прямоугольник правого столбца, в который введите значение напряженности магнитного поля в А/м первой опорной точки. Нажмите и отпустите клавишу [Tab] — выделение переходит к правому черному прямоугольнику во втором ряду. Снова введите число, и так до последнего элемента матрицы. Результат описанной работы показан в Приложении 22.

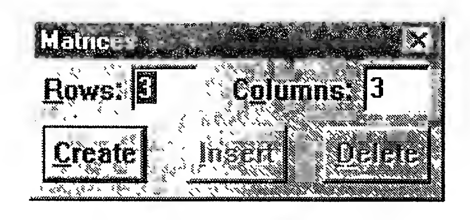


Рис. 9. Окно Matrices (Матрица)

Если у пользователя нет файла данных с координатами кривой намагничивания и ее аппроксимацию он хочет провести с использованием ввода координат с клавиатуры с помощью инструмента **Матрица,** то ему достаточно в документе **B(H)** (Приложение 1) операторы (1 — 3) заменить одной матрицей. Если в нее не включать точку кривой, совпадающую с началом координат, то матрица заменит только строку (1) Приложения 1.

2.3. Изменение размеров матрицы

Можно изменить размер матрицы, вставив или удалив строки и (или) столбцы. Для этого щелкните на числовом значении элемента матрицы. В районе этого элемента возникает синяя вертикальная черта. С помощью меню **Math — Matrices** вызовите на экран диалоговое окно **Matrices** (рис. 9). В поле **Rows**: отредактируйте число строк, которое нужно ввести (или удалить), а с помощью поля **Columns:** — число столбцов. Щелкните на кнопке **Insert** при добавлении (или **Delete** при удалении). Если создаются строки, то MCAD вставляет строки с черными прямоугольниками ниже выделенного элемента; если создаются столбцы — справа от выделенного элемента.

Чтобы вставить строку выше верхней строки или столбец слева от левого столбца, надо заключить всю матрицу в выделяющую рамку с помощью щелчка внутри матрицы и нлавиши [↑]; затем вызвать диалог **Matrices** (рис. 9), заполнить его поля и щелкнуть на кнопке **Insert.** MCAD начинает удаление строк и столбцов с выделенного элемента матрицы и продолжает удаление вниз и направо от него. Чтобы не удалять или не добавлять строки (столбцы), надо в диалоге **Matrices** в поле **Rows: (Columns:)** ввести 0 (ноль). Чтобы удалить всю матрицу, надо заключить ее в выделяющую рамку, нажать и отпустить клавишу [Del].

3. Некоторые примеры редактирования рабочих документов MCAD

Поясняются только те приемы редактирования, которые могут понадобиться для преобразования рабочего документа с вводом координат опорных точек из файла данных в документ с вводом координат опорных точек с клавиатуры.

Любой рабочий документ может состоять из объектов трех типов: математических, текстовых и графических. *Для выделения любого объекта* любого типа необходимо нажать левую кнопку мыши на свободном месте документа и, не отпуская ее, перемещать курсор мыши, который в это время имеет вид стрелки, так, чтобы острие этой стрелки попало внутрь выделяемой области. Перетаскивание курсора от точки, в которой мы нажали кнопку, до текущей точки сопровождает прямоугольник с непрерывно изменяющимися горизонтальными и вертикальными штриховыми сторонами. Как только этот прямоугольник начинает частично перекрывать область какого-либо объекта (текста, математического выражения или рисунка), так вокруг области этого объекта возникает вторичный штриховой прямоугольник выделения. Если при перемещении мы хотя бы частично перекрываем первичным штриховым прямоугольником несколько объектов, то выделяются они все. Как только мы отпустим левую кнопку мыши, так ее курсор в виде стрелки заменится знаком + (плюс) черного цвета, первичный штриховой прямоугольник пропадет, а вторичные останутся. Теперь можно проводить с выделенными объектами следующие действия: *удалить* (для этого достаточно нажать и отпустить клавишу [Del]), *удалить в буфер межпрограммного обмена* (для этого надо щелкнуть на кнопке панели управления с изображением ножниц), *скопировать в буфер* (щелкнуть на 7-й кнопке слева в 4-м ряду сверху на рис. 4), *перетащить с помощью мыши в другое место рабочего документа.* Для перетаскивания надо снова нажать левую кнопку мыши (при этом ее курсор должен иметь форму знака плюс, что свидетельствует о том, что он находится внутри одной из выделенных областей) и, не отпуская левую кнопку мыши, перемещать последнюю. На экране одновременно с движением мыши будут перемещаться и выделенные штриховыми прямоугольниками области. Если теперь отпустить левую кнопку мыши, затем передвинуть мышь так, чтобы ее курсор в виде знака плюс превратился в белую стрелку с черным тонким контуром (это свидетельствует о том, что он покинул пределы выделенных областей) и щелкнуть левой кнопкой мыши, то выделения (штриховые прямоугольники) объектов пропадут, а последние останутся на новых местах. При одновременном перемещении нескольких объектов их взаимное положение не меняется.

Для выравнивания нескольких объектов по горизонтали или по вертикали надо выделить их и щелкнуть на 9-й или 10-й слева кнопке строки инструментов (4-я сверху) рис. 4. Эти кнопки становятся активными (их яркость заметно возрастает) только после выделения нескольких объектов. На рис. 4 и 5 они показаны в неактивном состоянии. На кнопке для выравнивания по горизонтали изображены три прямоугольника в один ряд, а на кнопке для выравнивания по вертикали — три прямоугольника в один столбец.

Для редактирования любой текстовой области достаточно щелкнуть левой кнопкой мыши, когда ее курсор в виде стрелки указывает острием на место редактирования. После щелчка возникает текстовый курсор в виде тонкой красной вертикальной черты, а текстовая область окружается прямоугольником из сплошных тонких черных линий. После этого текст можно редактировать с использованием приемов, принятых в большинстве текстовых редакторов. Для выхода из режима редактирования надо щелкнуть на свободном поле документа. При этом рамка вокруг отредактированного текста и текстовый курсор пропадают.

В MCAD 6 вновь создаваемые объекты не раздвигают существующие. Поэтому если возникает потребность *в некотором районе документа, уже занятом объектами, вставить новый объект,* то необходимо для последнего подготовить свободное пространство. Для этого надо щелкнуть на строке **Ins/Del Blank Lines...** (Вставить/Удалить пустые строки...) меню **Edit** (Правка). Возникает окно диалога **Insert/Delete Blanks Lines**, в поле **Number of lines:** (Число строк) которого следует ввести с клавиатуры требуемое число свободных строк, а потом щелкнуть на кнопке **Insert** (Вставить). Аналогичные операции требуются и для удаления пустых строк с экрана. Только после указания их числа необходимо щелкнуть на кнопке **Delete** (Удалить) рассматриваемого окна диалога.

Для серьезной работы в системе MCAD, в том числе для создания собственных рабочих документов, необходимо обратиться к [3, 4].

4. Работа пользователя с декартовыми графиками

На английском языке подлинника системы MCAD график в прямоугольной системе координат называется X-Y Plot, в русскоязычных версиях [3, 4] — декартовым. Французский математик Рене Декарт предложил несколько иную систему графического изображения функции на плоскости. Отдавая дань уважения его имени, а также учитывая традиции и краткость этого термина, далее график в прямоугольной системе координат тоже будем называть декартовым.

4.1. Три типа декартовых графиков системы MCAD

Декартов график в системе MCAD можно построить только в том случае, если связать его с какой-то предварительно заданной дискретной переменной. Последняя должна отражаться и в выражении для оси абсцисс, и в выражении для оси ординат. MCAD рисует на графике точку для каждого значения дискретной переменной и по умолчанию соединяет соседние точки прямыми линиями. Если этих точек достаточно много, то в результате на графике получается плавная кривая, например как $i2_n$ на рис. 1 Приложения 11; мало — ломаная линия, как на рис. 2 там же. В зависимости от связи с дискретной переменной величин, отложенных по осям координат, можно выделить три основных типа декартовых графиков, которые позволяет строить MCAD.

1) График функции, аргументом которой является дискретная переменная.

Примеры таких графиков — рис. 5 и 6 Приложения 1. По осям абсцисс отложена дискретная переменная H (напряженность магнитного поля), заданная над рис. 3 Приложения 1. По осям ординат отложены функции $\mu(H) \cdot 10^3$ и $\mu r(H)$, аргументами которых является дискретная переменная H.

2) Графическое представление одномерного массива (вектора).

По оси абсцисс откладывается дискретная переменная, а по оси ординат — вектор. Примеры таких графиков показаны на рисунках Приложений 5 и 6. По осям их абсцисс откладывается дискретная переменная t: = 0..100, введенная в конце п. 3 Приложения 5 и в п. 1 Приложения 6. По осям ординат откладываются текущие значения векторов в общем виде, о чем говорят их индексы t. Этот тип графика требует целочисленную дискретную переменную. Если дискретная переменная может быть отрицательной или дробной, то надо строить график третьего типа.

3) Отображение одного вектора относительно другого.

Примеры таких графиков показаны на рис. 3 — 7 Приложения 8. По осям абсцисс этих рисунков отложен элемент вектора t в общем виде (с индексом n, где n: = 0..100 — дискретная переменная, заданная в строке (9) Приложения 8). По осям ординат этих графиков отложены элементы других векторов тоже в общем виде (с тем же индексом n). Причем в качестве второго вектора можно использовать и значения функции $(i(\Phi_n)$ на рис. 4 того же приложения).

4) Другие типы декартовых графиков.

Являются частными случаями трех основных типов, перечисленных выше. На рис.1 Приложения 4, а также на рис. 3.11 показаны примеры изображения констант на декартовом графике. По оси ординат откладывается константа (0 для изображения напряжения IR на активном сопротивлении обмотки в виде одной горизонтальной прямой и −IR/20 для изображения тока I в виде другой), а по оси абсцисс для построения этих двух горизонтальных линий — дискретная переменная r: = 0,0.5 · IR..IR, заданная в (2) Приложения 4. На этих же рисунках показан пример изображения вертикальной линии определенной длины (напряжения IX на реактивном сопротивлении обмотки). Для этого по оси абсцисс откладывается константа IR, а по оси ординат — элемент одномерного массива U_X в общем виде (с индексом m, заданном в (6) Приложения 4).

4.2. Изменение предельных значений величин, отложенных по осям координат

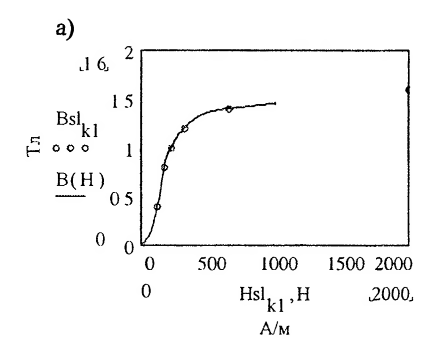
Все декартовы графики рабочих документов MCAD, приведенных в приложениях книги, можно разбить на два типа: 1) те, у которых предельные значения величин отложены вдоль осей координат по умолчанию (в автоматическом режиме); 2) те,

у которых эти значения введены с клавиатуры. При исполнении рабочих документов с другими исходными данными у пользователя может возникнуть необходимость в коррекции предельных значений величин декартовых графиков, как первого, так и второго типов, а также в построении других графиков с измененными предельными значениями величин, отложенных по осям координат.

Чтобы получить на базе одного графика другой с отличными от первого предельными значениями величин, отложенных по осям координат, надо исходный график взять в буфер межпрограммного обмена, вставить его копию на свободном месте рабочего документа и провести редактирование этой копии. Опишем, как на базе рис. 3, созданного в документе B(H) (Приложение 1) при автоматическом выборе шкал осей координат, был построен рис. 4 с назначенными автором предельными значениями величин, отложенных по осям координат.

Щелчок на поле рис. 3 выделяет его синей прямоугольной рамкой со скошенным правым верхним углом. Без синей рамки он изображен на рис. 10, *а* текущего приложения. По рис. 10, *а* видно, что после щелчка на рисунке возле начала и конца осей координат появляются вычисленные MCAD минимальные и максимальные граничные значения величин, которые при построении графика в автоматическом режиме должны быть отложены по осям координат (0 и 1.6 — минимальное и максимальное значения вектора Bs1 при минимальном k1 = 0 и максимальном k1 = sp = 6 значениях дискретной переменной k1; 0 и 2000 — минимальное и максимальное значения вектора Hs1, заданные теми же минимальным и максимальным значениями дискретной переменной k1). Заметим, что функция B(H) построена только до предельного значения дискретной переменной H: = 0,10..1000, заданной в строке над рис. 3 Приложения 1. Обратим также внимание на то, что MCAD по осям координат выбрал равномерную шкалу с предельной цифрой 2, а не 1.6. Остальные пределы по осям координат совпадают с выбранными MCAD, так как эти цифры (0 и 2000) хорошо подходят для равномерной шкалы. По рис. 10, *а* видно, что система MCAD под ненулевыми значениями каждого из вычисленных MCAD граничных значений величин, которые должны быть отложены вдоль осей координат при построении графика в автоматическом режиме, размещает по два маленьких уголка.

Для изменения предельного значения индукции по оси ординат щелкнем по цифре 1.6. Рамка вокруг рисунка пропадет, а в районе цифры 1.6 возникнет вертикальная синяя черта (курсор). Теперь достаточно нажать и отпустить клавишу [Del] или [BackSpace], как эта цифра будет заменена маленьким черным прямоугольником, окруженным синей рамкой. При этом кривая на графике и его сетка пропадут. С клавиатуры введем 0.9. Щелкнем на цифре 2000 и с клавиатуры исправим ее на 250. Нажмем клавишу [Enter] или щелкнем где-либо вне поля рисунка — получим график с новыми пределами величин, отложенных по осям координат. Чтобы увидеть эти введенные нами пределы, надо еще раз щелкнуть на поле рисунка — получим рис.



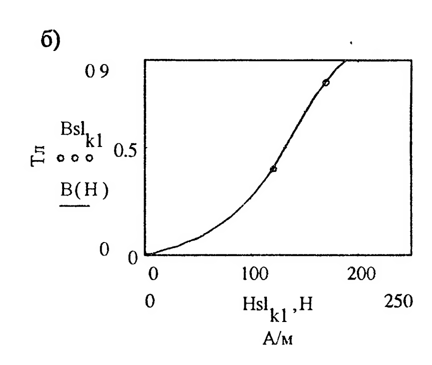


Рис. 10. Вид рис. 3 и рис. 4 документа B(H) (Приложение 1) после щелчка на этих рисунках. Предельные значения величин отложены по осям координат автоматически (*а*) и изменены пользователем (*б*)

10, *б* (синяя рамка, которая окружает любой рисунок после щелчка на нем, на рис. 10, *б* не показана). Как видим, под предельными цифрами на осях координат (0.9 и 250) уже нет уголков, которые были под цифрами 1.6 и 2000, рассчитанными MCAD при построении графика по умолчанию (рис. 10, *а*). Хорошо видно также, что длина осей координат графика рис. 10, *б*, построенного MCAD после ручного ввода предельных цифр, точно последним соответствует, хотя эти цифры рядом с осями и не стоят, так как не вписываются в выбранные MCAD два ряда цифр равномерных масштабов вдоль осей координат.

4.3. Изменение размеров графика и его редактирование

Для изменения размеров графика необходимо нажать левую кнопку мыши, когда ее указатель в виде белой стрелки, обведенной тонким черным контуром, расположен на свободном поле рабочего документа рядом с рисунком, и, не отпуская левую кнопку мыши, переместить указатель по направлению к рисунку. Как только он попадет внутрь области рисунка, последний будет выделен штриховым прямоугольником. Его правую и нижнюю стороны, а также правый нижний угол можно с помощью мыши перетаскивать, добиваясь нужного размера рисунка. Чтобы убрать выделяющий прямоугольник, достаточно щелкнуть где-либо на свободном поле рабочего документа.

Для редактирования рисунка, например, для замены подписи под ним, необходимо дважды щелкнуть на поле рисунка; в появившемся окне диалога **Formatting Currently Selected X-Y Plot** (Форматирование выделенного X-Y графика) выбрать вкладку **Labels** (Метки), а в рамке **Title** (Заголовок) заменить цифру 3 надписи Рис. 3 на цифру 4. Рис. 4 документа B(H) (Приложение 1) получен описанным способом из рис. 3 этого же документа. Рис. 4 отличается от рис. 10, *б* текущего приложения только подписью, пропорциями и отсутствием четырех цифр, указывающих предельные значения величин, отложенных по осям координат.

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

МАТРИЦА КООРДИНАТ ТОЧЕК КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ СПЛАВА 79НМ

$$BH := \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.6 & 10 \\ 0.65 & 20 \\ 0.7 & 30 \\ 0.75 & 50 \\ 0.8 & 100 \\ 0.83 & 500 \\ 0.85 & 1000 \end{bmatrix}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электромеханические** аппараты автоматики. Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. Н. Шоффа.— М.: Высшая школа, 1988.— 303 с.

2. **Буль О. Б.** Компьютерная графика на QuickBasic для электрических аппаратов: Учебное пособие для вузов.— М.: Изд-во МГОУ, 1998.— 472 с.

3. **MathCAD** 6.0 Plus. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows 95 (Руководство пользователя).— М.: ИИД «Филин», 1997.— 712 с.

4. **Дьяконов В. П.** Справочник по Mathcad Plus 7.0 Pro (Универсальная система математических расчетов).— М.: СК Пресс, 1998.— 352 с.

5. **Никитенко А. Г., Гринченков В. П., Иванченко А. Н.** Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов.— М.: Высшая школа, 1990.— 231 с.

6. **Основы** теории электрических аппаратов. И. С. Таев, Б. К. Буль, А. Г. Годжелло и др./ Под ред. И. С. Таева.— М.: Высшая школа, 1987.— 352 с.

7. **Основы** теории электрических аппаратов. Б. К. Буль, Г. В. Буткевич, А. Г. Годжелло и др./ Под ред. Г. В. Буткевича.— М.: Высшая школа, 1970.— 600 с.

8. **Тер-Акопов А. К.** Динамика быстродействующих электромагнитов.— М.— Л.: Энергия, 1965.— 168 с.

9. **Гинзбург С. Г.** Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях/Под ред. И. И. Теумина.— М.: Советское радио, 1954.— 252 с.

10. **Буль О. Б.** Расчеты магнитных цепей на ЭВМ.— М.: Изд-во МГОУ, 1993.— 57 с.

11. **Тихомиров П. М.** Расчет трансформаторов.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 526 с.

12. **Дружинин В. В.** Магнитные свойства электротехнических сталей.— М.: Энергия, 1974.— 240 с.

13. **Прецизионные** сплавы: Справочник /Под ред. Б. В. Молотилова.— М.: Металлургия, 1983.— 483 с.

14. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.** Электротехнические материалы. — Л.: Энергоатомиздат, 1985.— 304 с.

15. **Мишин Д. Д.** Магнитные материалы.— М.: Высшая школа, 1991.— 384 с.

16. **Конструкционные** и электротехнические материалы/В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, С. Я. Попов и др.; Под ред. В. А. Филикова.— М.: Высшая школа, 1990.— 296 с.

17. **Справочник** по электротехническим материалам. В 3-х т./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева, т. 3.— Л.: Энергоатомиздат, 1988.— 728 с.

18. **Электрические** и электронные аппараты. Ю. К. Розанов, Е. Г. Акимов, Н. А. Ведешенков и др./Под ред. Ю. К. Розанова.— М.: Энергоатомиздат, 1998.— 752 с.

19. **Буль О. Б.** Динамика работы электромагнита постоянного тока на MathCAD 6.0 PLUS. Тезисы докладов III Международной конференции по электромеханике и электротехнологиям (МКЭЭ-98, Россия, Клязьма).— М.: Изд-во МЭИ, 1998.— С. 346 — 347.

20. **Росс Нелсон.** Running Visual Basic 3 for Windows: Пер. с англ.— М.: Издат. отдел «Русская Редакция» ТОО «Channe Trading Ltd.», 1995.— 384 с.

21. **Microsoft** Graph 3.0b. Copyright 1985 — 1993.

22. **Додж М.** и др. Эффективная работа с Excel 7.0 для Windows 95: Пер. с англ.— СПб.: Питер, 1997.— 1040 с.

23. **The ChartBuilder** Custom Control. Copyright Bit Per Second Ltd., 1991 — 1993.

24. **Корнелл Г.** Программирование в среде Visual Basic 5: Пер. с англ.— Минск: ООО «Попурри», 1998.— 608 с.

25. **Mathcad 8.** Copyright MathSoft, Inc. 1986 — 1998.

26. **Мак-Клелланд Д.** CorelDraw! 5 для «чайников».— К.: «Диалектика», 1995.— 336 с.

27. **Microsoft** Graph 97 SR-1. Copyright 1985 — 1997.

28. **Microsoft** Excel 97 SR-1. Copyright 1985 — 1997.

29. **Microsoft** Word 97 SR-1. Copyright 1983 — 1997.

30. **Херхагер М., Партолль Х.** MathCAD 2000. Полное руководство: Пер. с нем. — К.: BHV, 2000.— 416 с.